

# **Ansatz zur Modellierung generischer Flughäfen im globalen Lufttransportsystem**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Peter Willems

aus  
Bautzen

2020

Vorsitzender des Prüfungsausschusses: Prof. Dr. rer. nat. Ralf God

- |               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick    |
| 2. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz      |
| 3. Gutachter: | Dr. rer. nat. Andreas Deutschmann |

Mündliche Prüfung:

14.11.2019

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Lufttransportsysteme der Technischen Universität Hamburg (TUHH) respektive der Einrichtung Lufttransportsysteme des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Hamburg. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick. Er hat mich in den zurückliegenden Jahren stets ermuntert, das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren und die Promotion zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen. Ebenso danke ich ihm für die stets gute wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und für die stets konstruktiven sowie ideenbringenden Gespräche während dieser Zeit. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing Carsten Gertz und Dr. rer. nat. Andreas Deutschmann für die Übernahme des Zweit- bzw. Drittgutachtens und für die konstruktiven Anmerkungen, die die Arbeit inhaltlich und im wissenschaftlichen Ausdruck maßgeblich geprägt haben. Prof. Dr. rer. nat. Ralf God danke ich für die Übernahme der Leitung des Promotionsausschusses.

Ganz herzlichen Dank bin ich meinen lieben Kollegen Katrin, Bernd, Malte, Niklas, Robin, Steffen und Stephan geschuldet. Die fachlichen aber auch nicht-fachlichen Diskussionen mit euch waren immer inspirierend und produktiv. Durch euch und den stets positiven Teamgeist ist es mir immer eine Freude gewesen, ans Institut zu kommen und mich mit den aktuellen Fragestellungen rund um das Lufttransportsystem und meiner Promotion auseinanderzusetzen. So gingen auch schwierigere Phasen des Schreibens immer schnell vorbei. Ebenfalls bedanke ich mich bei Klaus für die sehr gute wissenschaftliche Betreuung, für die zahlreichen Gespräche mit vielen hilfreichen Hinweisen sowie kritischen Anmerkungen und für ein stets offenes Ohr bei den Problemen des Promotionsalltags. Auch danke ich meinen Studenten, die durch ihre Abschlussarbeiten und Praktika einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Ich danke außerdem meinen Eltern für ihre immerwährende Unterstützung auf meinem bisher eingeschlagenen Lebensweg und ganz besonders meiner Frau Lena, die mich in den letzten Jahren stets unterstützt und begleitet hat.

Hamburg, im Februar 2020

*Peter Willems*



# Kurzfassung

Das Lufttransportsystem ist ein komplexes, interaktives und sich ständig veränderndes System, in dem Flughäfen die Quellen und Senken der Flugdienstleistung der Fluggesellschaften repräsentieren. Jeder dieser Knoten besitzt bestimmte Merkmale, die bei genauerer Betrachtung ganz individuelle Ausprägungen aufweisen. Eine globale Betrachtung aller existierenden Flughäfen mit ihren individuellen Merkmalen ist folglich eine große Herausforderung, jedoch für wissenschaftliche Fragestellungen auf globaler Lufttransportsystemebene notwendig.

Diese Arbeit zeigt einen Ansatz zur Modellierung von parametrischen bzw. generischen Flughäfen auf. Flughafen-nahe Elemente des Lufttransportsystems, die einen Einfluss auf die operationellen Abläufe und die ökonomische Entwicklung von Flughäfen haben, werden ebenso in die Modellierung einbezogen.

Es erfolgt ein Abstrahieren und bewusstes Weglassen von einzelnen, spezifischen Ausprägungen, da einerseits das globale Netzwerkverhalten im Vordergrund steht und andererseits Datenressourcen in der Wissenschaft nur begrenzt verfügbar sind. Die Arbeit mündet in sogenannten *Flughafenklassen* respektive *Flughafenrepräsentanten*, die zur Reduzierung der Komplexität von Flughafeninstanzen in überregionalen und globalen Studien auf Lufttransportsystemebene beitragen. Auf Basis einer hierarchisch, agglomerativen Clusteranalyse steht hier ein Objekt stellvertretend für eine ganze Klasse von Flughäfen, so dass eine allgemeine Anwendbarkeit sowie einfache Integrierbarkeit gegeben sind. Gleiches gilt auch für die Modellierung bezüglich der Fluggesellschaften, die in *Fluggesellschaftsklassen* respektive *Fluggesellschaftsrepräsentanten* mündet. Ebenfalls thematisiert wird eine Methodik zur Modellierung von generischen Flugplänen, dem verbindenden Element zwischen den beiden oben genannten Stakeholdern. Typische Flugplanelemente, wie z. B. der eingesetzte Luftfahrzeugtyp oder die operierende Fluggesellschaft, werden durch generische Klassen ersetzt.

Drei Beispiele zeigen Anwendungsfälle von generischen Flughäfen auf. Beispiel I geht auf kapazitive Trendaussagen für Flughäfen des Lufttransportsystems unter Einbeziehung von Quell- und Zielverkehren mit reduziertem Modellierungsaufwand ein. Zentraler Ansatzpunkt für solche Analysen ist das Ersetzen der realen Flughäfen durch die Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse. In Beispiel II wird aufgezeigt, wie bestimmte Merkmale von Flughafenklassen bzw. -repräsentanten für die Modellierung von Routenwahlmodellen herangezogen werden können. Näher eingegangen wird auf die Reisequalität von Passagieren und wie Merkmale der Intermodalität oder des Komforts von Flughäfen in Routenwahlmodelle einbezogen werden können. Weiterhin wird in Beispiel III erläutert, inwieweit die Flughafenklassifizierung zur Übertragung wissenschaftlicher Studien genutzt werden kann, die in der Regel nur an einem bestimmten Flughafen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern einen Beitrag zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Flughäfen und Fluggesellschaften auf einer breiten Datenbasis und festgelegter Merkmale, wodurch ein effizienter Ansatz zur Modellierung erreicht wird.



# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>X</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>SYMBOLVERZEICHNIS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 FLUGHÄFEN UND FLUGGESELLSCHAFTEN IN EUROPA .....	1
1.2 ZIELSETZUNG UND MOTIVATION .....	3
1.3 AUFBAU DER ARBEIT.....	5
<b>2 FLUGHAFENSPEZIFISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>8</b>
2.1 BEDEUTUNG UND ENTWICKLUNG VON FLUGHÄFEN IM LUFTTRANSPORTSYSTEM .....	8
2.2 DER FLUGHAFEN ALS VERKEHRSKNOTENPUNKT.....	10
2.2.1 Flughafen-Landseite und Intermodalität.....	11
2.2.2 Terminalbereich .....	12
2.2.3 Flughafen-Luftseite .....	14
2.2.4 Stand der Wissenschaft - Operationelle Leistungsfähigkeit von Flughafenelementen .....	15
2.3 DER FLUGHAFEN ALS KOMMERZIELLES UNTERNEHMEN .....	18
2.3.1 Geschäftsmodelle und -strategien .....	18
2.3.2 Erlös- und Kostenstruktur .....	19
2.3.2.1 Verkehrserlöse.....	20
2.3.2.2 Kommerzielle Erlöse.....	21
2.3.2.3 Kosten .....	22
2.3.2.4 Einflussfaktoren auf Kosten und Erlöse .....	22
2.3.3 Stand der Wissenschaft - Geschäftsmodelle und betriebswirtschaftliche Ausrichtung .....	23
2.4 FLUGHÄFEN UND DIE ROLLE DER FLUGGESELLSCHAFTEN.....	26
2.5 NEUER MODELLANSATZ.....	28
<b>3 MODELLIERUNGSTECHNIKEN - DEFINITIONEN UND GRUNDLAGEN</b> .....	<b>30</b>
3.1 SYSTEM- UND MODELLBEGRIFF .....	30
3.2 GRUNDLAGEN DER CLUSTERANALYSE .....	32
3.2.1 Auswahl/Extraktion von Merkmalen .....	32
3.2.2 Arten von Clusteralgorithmen.....	33
3.2.3 Ähnlichkeits- bzw. Proximitätsmaß .....	35
3.2.4 Hierarchisch, agglomerativer Fusionsalgorithmus (Linkage Rule).....	38
3.2.5 Clusteranzahl und Auswertung der Clusteranalyse .....	39
3.2.6 Stand der Wissenschaft - Modellierungstechnik Clusteranalyse.....	42
3.3 STATISTISCHE METHODEN.....	45
3.3.1 Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	45
3.3.2 Statistische Testverfahren.....	49
3.3.2.1 Statistische Hypothesen und Testentscheidungen .....	49
3.3.2.2 Chi-Quadrat ( $\chi^2$ ) Anpassungstest.....	50
3.3.3 Urnenmodell.....	52
3.4 PROGNOSEN ZUR ENTWICKLUNG VON FLUGHAFENMERKMALEN.....	53

3.4.1	Passagier- und Verkehrsnachfrage .....	53
3.4.2	Frequenz und Kapazität von Flugbewegungen .....	54
3.5	VERFÜGBARKEIT UND QUALITÄT DER DATEN .....	56
<b>4</b>	<b>MODELLIERUNG GENERISCHER FLUGHÄFEN UND FLUGHAFENNAHER ELEMENTE.....</b>	<b>59</b>
4.1	VORGEHENSWEISE.....	59
4.2	DEFINITION VON FLUGHAFENKLASSEN.....	60
4.2.1	Einteilung von Flughäfen in der Literatur .....	60
4.2.2	Grundgesamtheit und Stichprobe .....	62
4.2.3	Auswahl der Merkmale.....	63
4.2.4	Clusteranalyse I - Flughäfen.....	66
4.2.4.1	Fusionsalgorithmus .....	66
4.2.4.2	Clusteranzahl.....	66
4.2.4.3	Silhouetten.....	67
4.2.5	Klassen von Flughäfen .....	69
4.2.6	Sensitivität der Klassifizierung.....	77
4.2.7	Zuordnung von neuen Flughäfen zur Klassifizierung .....	78
4.2.8	Diskussion und Zusammenfassung.....	80
4.3	DEFINITION VON FLUGGESELLSCHAFTSKLASSEN .....	83
4.3.1	Grundgesamtheit und Stichprobe .....	83
4.3.2	Auswahl der Merkmale.....	84
4.3.3	Clusteranalyse II - Fluggesellschaften.....	86
4.3.3.1	Fusionsalgorithmus und Clusteranzahl.....	86
4.3.3.2	Silhouetten.....	87
4.3.4	Klassen von Fluggesellschaften .....	88
4.3.5	Diskussion und Zusammenfassung.....	92
4.3.6	Einbindung der Fluggesellschaftsklassen .....	95
4.4	ERLÖSE UND KOSTEN DER FLUGHAFENKLASSEN.....	96
4.4.1	Verkehrsentgelte.....	96
4.4.2	Nicht-flugbezogene, kommerzielle Erlöse .....	98
4.4.3	Kosten von Flughäfen.....	99
4.5	ERSTELLUNG VON GENERISCHEN FLUGPLÄNEN FÜR FLUGHAFENKLASSEN .....	100
4.5.1	Flugplan und Slots .....	101
4.5.2	Start- und Landebahnssystem .....	102
4.5.3	Start- und Landebahnkapazität .....	104
4.5.4	Schrittweise Modellierung von generischen Flugplänen .....	105
4.5.4.1	Datenzusammenführung und Umwandlung in generische Klassen .....	106
4.5.4.2	Wochenganglinie der Flugbewegungen .....	107
4.5.4.3	Entwicklung generischer Flugpläne .....	109
4.5.4.4	Prognose zukünftiger Flugpläne.....	112
4.5.5	Ergebnisse der Modellierung generischer Flugpläne .....	113
4.5.6	Diskussion und Zusammenfassung.....	117
4.6	WEITERE FLUGHAFENELEMENTE.....	118
<b>5</b>	<b>VERIFIZIERUNG DER ERGEBNISSE - GENERISCH VS. DETAILBETRACHTUNG ....</b>	<b>120</b>
5.1	VERGLEICH VON REALDATEN UND GENERISCHEN WERTEN EINER BEGRENZTEN REGION .....	120
5.1.1	Fallbeispiel I - Deutschland.....	120
5.1.2	Fallbeispiel II - Nordamerika.....	124
5.1.3	Fallbeispiel III - Ostasien.....	128
5.2	AUSWERTUNG DER FALLBEISPIELE.....	131
<b>6</b>	<b>ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR FLUGHAFENKLASSEN .....</b>	<b>136</b>
6.1	KAPAZITIVE TRENDAUSSAGEN VON EINZELFLUGHÄFEN .....	136



6.2	AUSWIRKUNGEN VON FLUGHAFENMERKMALEN AUF DIE MODELLIERUNG VON ROUTENWAHLMODELLEN .....	139
6.2.1	Flug- und Routennetzwerk.....	139
6.2.2	Nachfrageprognosen und Reisequalität (Quality of Travel) .....	140
6.2.3	Erweiterung von Routenwahlmodellen/des QTI um Flughafencharakteristika auf Basis der Flughafenklassen .....	144
6.3	ÜBERTRAGBARKEIT VON FORSCHUNGSSTUDIEN .....	147
6.3.1	Das PASSME Projekt .....	147
6.3.2	Übertragung der Ergebnisse auf andere Flughäfen.....	148
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....	150
7.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	150
7.2	KRITISCHE BEWERTUNG DER ERGEBNISSE .....	151
7.3	WEITERFÜHRENDE STUDIEN.....	152
8	ANHANG .....	155
8.1	ANHANG A .....	155
8.1.1	Gate-/Vorfeld-Kapazität.....	155
8.1.2	Taxiway-Kapazität .....	155
8.2	ANHANG B .....	156
8.2.1	Nächste-Nachbarn- und Mittelwertverfahren .....	156
8.2.2	Clusterzentren-Verfahren.....	156
8.3	ANHANG C .....	158
8.3.1	Flughafenmerkmale.....	158
8.3.2	Korrelationsanalyse der Merkmale des Flughafenbetriebs.....	160
8.3.3	Clusteranalyse I - Flughäfen.....	162
8.3.4	Ergebnisse Clusteranalyse I, Flughafenklassen .....	172
8.4	ANHANG D .....	175
8.4.1	Merkmale der Fluggesellschaften .....	175
8.4.2	Korrelationsanalyse der Merkmale von Fluggesellschaften .....	177
8.4.3	Clusteranalyse II - Fluggesellschaften.....	180
8.4.4	Ergebnisse Clusteranalyse II, Fluggesellschaftsklassen .....	185
8.5	ANHANG E.....	188
8.5.1	Vergleich von Flughafenentgelten I .....	188
8.5.2	Vergleich von Flughafenentgelten II.....	189
8.6	ANHANG F.....	191
8.6.1	Beispiel zur Bestimmung der stündlichen SLB-Kapazität .....	191
8.6.2	Abschätzung der stündlichen SLB-Kapazität der Flughafencluster .....	193
8.7	ANHANG G .....	196
8.7.1	Weitere Wochenganglinien der Internationalen Hub-Flughäfen .....	196
8.7.2	Weitere Tagesganglinie der Internationalen Hub-Flughäfen .....	198
8.8	ANHANG H .....	199
8.8.1	Alternative Quellen für Fallbeispiel II: Nordamerika.....	199
9	LITERATURVERZEICHNIS .....	201

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit. ....	7
Abbildung 2-1: Modell des Lufttransportsystems - Stakeholder und externe Entitäten [41]. ....	9
Abbildung 2-2: Einteilung von Flugplätzen nach LuftVG, in Anlehnung an [47]. ....	10
Abbildung 2-3: Funktionen und infrastrukturelle Betriebsanlagen der Flughafen-Landseite, in Anlehnung an [35] S. 276. ....	12
Abbildung 2-4: Funktionen und infrastrukturelle Betriebsanlagen des Flughafen- Terminalbereiches, in Anlehnung an [35] S. 277. ....	14
Abbildung 2-5: Funktionen und infrastrukturelle Betriebsanlagen der Flughafen-Luftseite, in Anlehnung an [35] S. 277. ....	15
Abbildung 2-6: Verteilung der kommerziellen Erlöse an ACI Flughäfen nach Kontinenten, 2006, [73] S. 6, [52] S. 195. ....	21
Abbildung 2-7: Entwicklung des Check-in Verhaltens am Hamburger Flughafen, Datenquelle: regelmäßige Fluggastbefragung am Flughafen Hamburg, Statistische Analyse von Löwa [83]. ....	24
Abbildung 2-8: Entwicklung des Passagieraufkommens an deutschen Verkehrsflughäfen, 2005 = 100, in Anlehnung an [99]. ....	27
Abbildung 3-1: Vorgehen bei der Clusteranalyse, in Anlehnung an [109] S. 646. ....	32
Abbildung 3-2: Vorgehen bei der Extraktion von Merkmalen. ....	33
Abbildung 3-3: Einteilung von Clusteralgorithmen mit Fokus auf hierarchisch, agglomerativen Verfahren [115], [111]. ....	34
Abbildung 3-4: Ähnlichkeits- bzw. Proximitätsmaße. ....	36
Abbildung 3-5: Schematischer Ablauf eines hierarchisch, agglomerativen Clusterverfahrens. ....	38
Abbildung 3-6: Schematisches Dendrogramm (links) und Struktogramm (rechts). ....	40
Abbildung 3-7: Box-Plot. ....	42
Abbildung 3-8: Dichtefunktion und Flächenanteile der NV, in Anlehnung an [131] S. 14. ....	46
Abbildung 3-9: Dichtefunktion der Weibull-Verteilung mit verschiedenen Parameterwerten, in Anlehnung an [131] S. 16. ....	47
Abbildung 3-10: Dichtefunktion der Exponentialverteilung mit verschiedenen Parameterwerten, in Anlehnung an [131] S. 8. ....	48
Abbildung 3-11: Dichtefunktion der Poisson-Verteilung mit verschiedenen Parameterwerten. ....	49
Abbildung 3-12: Jährliches, globales Wachstum [%] des Passagiervolumens, der LFZ-Kapazität und der Flugfrequenz, 2001 - 2012, Datenbasis: [7], nur Scheduled Flights. ....	53
Abbildung 3-13: Klassifizierung der Segmente innerhalb des FoAM-Modells nach Passagiervolumen pro Monat, Sitzplatzkapazität des Luftfahrzeugs und zurückgelegter Distanz. ....	55
Abbildung 3-14: Diskrete (links) und kontinuierliche Verteilung (rechts) der LFZ-Größen (Verkehrsmix), Distanz-Klasse: 401 - 800 km, in Anlehnung an [141, 142]. ....	56
Abbildung 4-1: Vorgehensweise in Anlehnung an das V-Modell. ....	60
Abbildung 4-2: Geografische Verteilung der Flughäfen des Stichprobenumfangs. ....	63
Abbildung 4-3: Auffinden der Clusteranzahl für Clusteranalyse I unter Nutzung der L method. ....	67
Abbildung 4-4: Silhouetten der Clusteranalyse I, vor der Optimierung. ....	68
Abbildung 4-5: Silhouetten der Clusteranalyse I, nach der Silhouettenoptimierung. ....	68
Abbildung 4-6: Kleine Regionalflughäfen in Europa, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155]. ....	71
Abbildung 4-7: Kleine Regionalflughäfen, alle Regionen außer Europa, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155]. ....	71
Abbildung 4-8: Große Regionalflughäfen in Europa, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155]. ....	72

Abbildung 4-9: Große Regionalflughäfen in Nordamerika, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	72
Abbildung 4-10: Große Regionalflughäfen in Asien/Pazifik, Ozeanien und Südamerika, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	73
Abbildung 4-11: Internationale Flughäfen in Afrika, Europa, Asien/Pazifik und Ozeanien, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	73
Abbildung 4-12: Internationale Flughäfen in Nord- und Südamerika, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	74
Abbildung 4-13: Sekundär-Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	74
Abbildung 4-14: Internationale Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	75
Abbildung 4-15: Hochfrequenz-Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	76
Abbildung 4-16: Fracht-Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].	76
Abbildung 4-17: Ausschnitt des Dendrogramm zur Clusteranalyse mit BEJ, x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA 3-Letter-Code der FH, vor der Silhouettenoptimierung.	79
Abbildung 4-18: Histogramm & Box-Plot der Kleinen Regionalflughäfen; Links: Fracht [Tonnen/Jahr], Rechts: Anteil der Umsteiger.	81
Abbildung 4-19: Histogramm & Box Plot; Links: Fracht [Tonnen/Jahr] der Großen Regionalflughäfen, Rechts: Passagiere [PAX] der Fracht-Hub-Flughäfen.	81
Abbildung 4-20: Geografische Verteilung der Fluggesellschaften.	83
Abbildung 4-21: Auffinden der Clusteranzahl für Clusteranalyse II unter Nutzung der L method.	86
Abbildung 4-22: Silhouetten der Clusteranalyse II, vor der Optimierung.	87
Abbildung 4-23: Silhouetten der Clusteranalyse II, nach der Optimierung.	88
Abbildung 4-24: Histogramm & Box-Plot der Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften; Links: Passagieranzahl [PAX], Rechts: Fracht [Tonnen/Jahr].	93
Abbildung 4-25: Phasenablaufdiagramm der Modellierung von generischen Flugplänen.	106
Abbildung 4-26: Beispiel zur Umwandlung der Flugplaninformationen in generische Klassen.	107
Abbildung 4-27: Exemplarische Überlagerung der Flugbewegungen aller Flughäfen einer Flughafenklasse.	108
Abbildung 4-28: Exemplarische Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Flugbewegungen innerhalb eines Zeitfensters.	108
Abbildung 4-29: Exemplarische Wochenganglinie für eine Flughafenklasse.	109
Abbildung 4-30: Exemplarischer Entscheidungsbaum zur Bestimmung eines Fluges.	110
Abbildung 4-31: Beispielmatrix der LFZ-Klasse pro Zeitfenster und Wochentag.	111
Abbildung 4-32: Verschieben der Flüge beim Überschreiten der SLB-Kapazität.	112
Abbildung 4-33: Reale Verteilung der Flugbewegungen nach Passagier-, LFZ-, Distanz- und Fluggesellschaftsklassen der Abflüge an Internationalen Hub-FH im Sommer.	113
Abbildung 4-34: Generische Wochenganglinie (Sommer, Zeitfenster: 10 min, gleitende Stunde) der Abflüge der Internationalen Hub-Flughäfen.	114
Abbildung 4-35: Generische Tagesganglinie (Montag, Sommer, Zeitfenster: 10 min) der Abflüge der Internationalen Hub-Flughäfen.	115
Abbildung 4-36: Reale Verteilung der Flugbewegungen nach Passagier-, LFZ-, Distanz- und Fluggesellschaftsklassen der Ankünfte an Internationalen Flughäfen im Winter.	116
Abbildung 4-37: Generische Wochenganglinie (Winter, Zeitfenster: 10 min, gleitende Stunde) der Ankünfte der Internationalen Flughäfen.	116
Abbildung 5-1: Geografische Verteilung der Flughäfen des Fallbeispiels II, Quelle: [155].	124
Abbildung 5-2: Histogramm & Box-Plot der Passagiere [PAX/Jahr] für die Flughafenklasse der Fracht-Hub-Flughäfen.	125
Abbildung 5-3: Geografische Verteilung der Flughäfen des Fallbeispiels III, Quelle: [155].	129
Abbildung 5-4: Preisniveaus, OECD = 100, 2010, Datenquelle: [186].	134
Abbildung 6-1: Auswahl an Flughäfen in Europa, die vom Flughafen Paris-Charles de Gaulle (CDG) aus angeflogen werden, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code.	137

Abbildung 6-2: Modellierung der Flughäfen (außer CDG) durch den Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse (FHK).	137
Abbildung 6-3: Auswahl an Flughäfen in Amerika, die vom Flughafen Paris Charles-de-Gaulle (CDG) aus angeflogen werden, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code.	138
Abbildung 6-4: Ersetzen der Flughäfen (außer CDG) durch den Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse (FHK).	138
Abbildung 6-5: Beispielhaftes Flug- (schwarz) und Routennetzwerk (blau).	140
Abbildung 6-6: AIRCAST (Air Travel Forecast) Modell zur Modellierung des globalen LTS (4-Schichten Philosophie), in Anlehnung an [193], [194].	141
Abbildung 6-7: QTI kumuliert (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 0,7 (grün) ist die beste und 0,1 (rot) die schlechteste Qualität, [192].	141
Abbildung 6-8: QTI Flugfrequenz (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 0,1 (grün) ist die beste und 0,0 (rot) die schlechteste Qualität, [192].	142
Abbildung 6-9: QTI Transferqualität (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 1,0 (grün) ist die beste und 0,4 (rot) die schlechteste Qualität, [192].	142
Abbildung 6-10: QTI Reisezeit (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 0,7 (grün) ist die beste und 0,1 (rot) die schlechteste Qualität, [192].	142
Abbildung 6-11: Visualisierung der PASSME Experience Lounge am Flughafen Hamburg, Almadesign [206].	149
Abbildung 7-1: Schematische Darstellung eines künstlichen neuronalen Netzes, in Anlehnung an [216].	154
Abbildung 8-1: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Merkmale des Flughafenbetriebs.	160
Abbildung 8-2: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Erlösmerkmale von Flughäfen.	161
Abbildung 8-3: Dendrogramm Clusteranalyse I (Teil 1), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA 3-Letter-Code, vor der Silhouettenoptimierung.	169
Abbildung 8-4: Dendrogramm Clusteranalyse I (Teil 2), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA 3-Letter-Code, vor der Silhouettenoptimierung.	170
Abbildung 8-5: Konstellationsdiagramm der Clusteranalyse I, vor der Silhouettenoptimierung.	171
Abbildung 8-6: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Merkmale der Größe von Fluggesellschaften.	177
Abbildung 8-7: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Flottenmerkmale von Fluggesellschaften.	178
Abbildung 8-8: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Marktmerkmale von Fluggesellschaften.	179
Abbildung 8-9: Dendrogramm Clusteranalyse II (Teil 1), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA Code der FG, vor der Silhouettenoptimierung.	182
Abbildung 8-10: Dendrogramm Clusteranalyse II (Teil 2), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA Code der FG, vor der Silhouettenoptimierung.	183
Abbildung 8-11: Konstellationsdiagramm der Clusteranalyse II, vor der Silhouettenoptimierung.	184
Abbildung 8-12: Generische Wochenganglinie (Winter, Zeitfenster: 10 min) der Abflüge der Internationalen Hub-Flughäfen.	196
Abbildung 8-13: Generische Wochenganglinie (Sommer, Zeitfenster: 10 min) der Ankünfte der Internationalen Hub-Flughäfen.	197
Abbildung 8-14: Generische Wochenganglinie (Winter, Zeitfenster: 10 min) der Ankünfte der Internationalen Hub-Flughäfen.	197
Abbildung 8-15: Generische Tagesganglinie (Montag, Sommer, Zeitfenster: 10 min) der Ankünfte der Internationalen Hub-Flughäfen.	198

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Einteilung von Flughäfen nach ICAO, in Anlehnung an [48] S. 1-12.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile verschiedener Terminalkonzepte, in Anlehnung an [47] S. 307 ff. ....</i>	<i>13</i>
<i>Tabelle 2-3: Zusammenfassung der Quellen zur Modellierung/Bewertung der operationellen Leistungsfähigkeit von Flughäfen. ....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 2-4: Erlösverteilung an europäischen Flughäfen, in Anlehnung an [52] S. 72, Datenquelle für 2012: [72]. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 2-5: Zusammenfassung der Quellen zu Geschäftsmodellen und betriebswirtschaftliche Ausrichtung. ....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von ausgewählten Clusteralgorithmen; ✓ Übereinstimmung, ✗ Ablehnung. ....</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 3-2: Beispielhafte Distanzmatrix. ....</i>	<i>37</i>
<i>Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Quellen mit Anwendung von Clustertechniken im Forschungsfeld des Luftverkehrs. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 3-4: Mögliche Entscheidungssituationen bei statistischen Testverfahren, in Anlehnung an [133] S. 380, [132] S. 308. ....</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 4-1: FAA Flughafen-Klassifizierung, in Anlehnung an [149]. ....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 4-2: Kategorisierte, verfügbare Flughafenmerkmale; hellgrau: als maßgebend erachtete Merkmale; dunkelgrau: ausgewählte Merkmale, die in die Clusteranalyse einfließen. ....</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 4-3: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Merkmale pro Flughafenklasse, die in die Clusteranalyse einfließen, gerundet, 2012. ....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 4-4: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) von Merkmalen pro Flughafenklasse, zur Beschreibung der Cluster, gerundet, 2012. ....</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 4-5: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Merkmale pro Flughafenklasse, die in die Clusteranalyse einfließen, Clusteranalyse mit BEJ, gerundet, 2012. ....</i>	<i>80</i>
<i>Tabelle 4-6: Kategorisierte, verfügbare Merkmale von Fluggesellschaften; hellgrau: als maßgebend erachtete Merkmale; dunkelgrau: ausgewählte Merkmale, die in die Clusteranalyse einfließen. ....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 4-7: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Merkmale pro Fluggesellschaftsklasse, die in die Clusteranalyse einfließen, gerundet, 2010. ....</i>	<i>89</i>
<i>Tabelle 4-8: Weitere Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) von Merkmalen pro Fluggesellschaftsklasse, zur Beschreibung der Cluster, gerundet, 2010. ....</i>	<i>89</i>
<i>Tabelle 4-9: Clusterergebnis von Dewulf [124] S. 118, angegeben ist der IATA-Code, nur Fluggesellschaften mit kombiniertem Passagier-/Frachtverkehr. ....</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 4-10: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Flugbewegungsanteile der Fluggesellschaftsklassen (FBA d. FGK) pro Flughafenklasse, Datenbasis: [7]. ....</i>	<i>95</i>
<i>Tabelle 4-11: Klassen-spezifische MW und STABW der Terminal-Passagierentgelte pro PAX und Landeentgelte versch. LFZ-Typen pro Flughafenklasse, Datenquelle: [72], 2013. ....</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 4-12: Klassen-spezifische MW und STABW der Anteile der nicht-flugbezogenen Erlöse pro Flughafenklasse, Datenquelle [72]. ....</i>	<i>98</i>
<i>Tabelle 4-13: Klassen-spezifische MW und STABW verschiedener Kostenverhältnisse pro Flughafenklasse, Datenquelle [72]. ....</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 4-14: Regional-spezifische MW und STABW verschiedener Kostenverhältnisse der Internationalen Hub-Flughäfen, Datenquelle [72]. ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabelle 4-15: Start- und Landebahn-Layouts. ....</i>	<i>103</i>
<i>Tabelle 4-16: Vorherrschende SLB-Anordnung und Art des Betriebs pro Flughafenklasse. ....</i>	<i>104</i>
<i>Tabelle 4-17: Auszug aus der generischen Flugliste für Szenario I. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabelle 4-18: Auszug aus der generischen Flugliste für Szenario II. ....</i>	<i>117</i>

<i>Tabelle 4-19: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) von intermodalen Merkmalen und der Terminalgröße pro Flughafenklasse, Datenquellen: [176], [72] .....</i>	<i>119</i>
<i>Tabelle 5-1: Realdaten (2012) der ADV, Teilmenge (n = 14) der Verkehrsflughäfen Deutschlands, [177]. .....</i>	<i>121</i>
<i>Tabelle 5-2: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012, ADV) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht, Teilmenge (n = 14) der deutschen Verkehrsflughäfen, [177]. .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 5-3: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012, ADV) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht, alle 22 deutschen Verkehrsflughäfen, [107]. .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 5-4: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, FBA d. FGK = Flugbewegungsanteil der Fluggesellschaftsklassen, Teilmenge (n = 14) der deutschen Verkehrsflughäfen. ....</i>	<i>123</i>
<i>Tabelle 5-5: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Erlös und Terminal Passagierentgelt, Teilmenge (n = 14) der deutschen Verkehrsflughäfen. ....</i>	<i>123</i>
<i>Tabelle 5-6: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 78 nordamerikanischen Flughäfen. ....</i>	<i>125</i>
<i>Tabelle 5-7: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 78 nordamerikanischen Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf US-amerikanische Vertreter. ....</i>	<i>126</i>
<i>Tabelle 5-8: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, FBA d. FGK = Flugbewegungsanteil der Fluggesellschaftsklassen von 78 nordamerikanischen Flughäfen. ....</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 5-9: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Erlöse und Entgelte von 78 nordamerikanischen Flughäfen. ....</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 5-10: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012, [178]) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 56 US-amerikanischen Flughäfen. ....</i>	<i>128</i>
<i>Tabelle 5-11: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 18 ostasiatischen Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf asiatische Vertreter. ....</i>	<i>129</i>
<i>Tabelle 5-12: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, FBA d. FGK = Flugbewegungsanteil der Fluggesellschaftsklassen von 18 ostasiatischen Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf asiatische Vertreter. ....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 5-13: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Erlöse und Entgelte, 18 ostasiatische Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf asiatische Vertreter. ....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 5-14: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Personalkosten, variablen Kosten und des Erlöses pro Passagier und Weltregion. ....</i>	<i>132</i>
<i>Tabelle 5-15: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Terminal-Passagierentgelte pro PAX und Landeentgelte versch. LFZ-Typen pro Weltregion. ....</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 6-1: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der verschiedenen QTI-Summanden und des kumulierten QTI pro Flughafenklasse. ....</i>	<i>143</i>
<i>Tabelle 8-1: Distanzmatrix mit beispielhaften Distanzen zwischen den Objekten, die kleinste Distanz ist rot markiert. ....</i>	<i>157</i>
<i>Tabelle 8-2: Distanzmatrix mit fusionierten Objekten. ....</i>	<i>157</i>
<i>Tabelle 8-3: Beispielhafte Berechnung der neuen Distanzen. ....</i>	<i>157</i>
<i>Tabelle 8-4: Erläuterungen und Einflüsse/Auswirkungen der Flughafenmerkmale. ....</i>	<i>158</i>
<i>Tabelle 8-5: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Merkmale des Flughafenbetriebs. ....</i>	<i>160</i>
<i>Tabelle 8-6: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Erlösmerkmale von Flughäfen. ....</i>	<i>161</i>
<i>Tabelle 8-7: Ausprägung der Flughafenmerkmale, die in die Clusteranalyse einfließen, blau markiert sind imputierte Werte, gerundet, 2012. ....</i>	<i>162</i>
<i>Tabelle 8-8: Clusterverlauf der Clusteranalyse I. ....</i>	<i>167</i>

<i>Tabelle 8-9: Flughäfen pro Cluster, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, unterstrichen sind die Flughäfen, die im Zuge der Silhouettenoptimierung die Clusterzugehörigkeit gewechselt haben.</i>	172
<i>Tabelle 8-10: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (1).</i>	173
<i>Tabelle 8-11: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (2).</i>	173
<i>Tabelle 8-12: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (3).</i>	174
<i>Tabelle 8-13: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (4).</i>	174
<i>Tabelle 8-14: Erläuterungen und Einflüsse/Auswirkungen der Merkmale von Fluggesellschaften.</i>	175
<i>Tabelle 8-15: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Merkmale der Größe von Fluggesellschaften.</i>	177
<i>Tabelle 8-16: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Flottenmerkmale von Fluggesellschaften.</i>	178
<i>Tabelle 8-17: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Marktmerkmale von Fluggesellschaften.</i>	179
<i>Tabelle 8-18: Clusterverlauf der Clusteranalyse II.</i>	180
<i>Tabelle 8-19: Fluggesellschaften pro Cluster, angegeben ist der IATA Code, unterstrichen sind die FG, die im Zuge der Silhouettenoptimierung die Clusterzugehörigkeit gewechselt haben.</i>	185
<i>Tabelle 8-20: Clusteranalyse II - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (1).</i>	186
<i>Tabelle 8-21: Clusteranalyse II - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (2).</i>	186
<i>Tabelle 8-22: Clusteranalyse II - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (3).</i>	187
<i>Tabelle 8-23: Analyse der Flughafenentgelte der Boeing 747 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [163].</i>	188
<i>Tabelle 8-24: Analyse der Flughafenentgelte der Boeing 737 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [163].</i>	188
<i>Tabelle 8-25: Analyse der Flughafenentgelte der Airbus A320 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [163].</i>	189
<i>Tabelle 8-26: Verhältnis der Flughafenentgelte der A320/737 zur 747 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [163].</i>	189
<i>Tabelle 8-27: Analyse der Flughafenentgelte der Airbus A320 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].</i>	189
<i>Tabelle 8-28: Analyse der Flughafenentgelte der Airbus A330 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].</i>	190
<i>Tabelle 8-29: Analyse der Flughafenentgelte der Boeing 777 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].</i>	190
<i>Tabelle 8-30: Verhältnis der Flughafenentgelte der A320 zur A330/ 777 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].</i>	190
<i>Tabelle 8-31: SLB-Konfiguration und Nutzungsregeln, Auszug aus Abbildung 2-2 in [170] S. 82 ff.</i>	192
<i>Tabelle 8-32: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Internationalen FH.</i>	193
<i>Tabelle 8-33: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Großen Regional-FH.</i>	194
<i>Tabelle 8-34: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Kleinen Regional-FH.</i>	194
<i>Tabelle 8-35: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Fracht-Hub-FH.</i>	194
<i>Tabelle 8-36: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Internationalen Hub-FH.</i>	195
<i>Tabelle 8-37: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Hochfrequenz-Hub-FH.</i>	195
<i>Tabelle 8-38: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Sekundäre Hub-FH.</i>	195
<i>Tabelle 8-39: Zugestiegene Passagiere (Enplanements) und Landed Weight für US-amerikanische Flughäfen, Teilmenge, 2012, Datenquelle: [178].</i>	199

## Abkürzungsverzeichnis

AC	Aircraft (Luftfahrzeug)
ACARE	Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe
ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen e. V.
AL	Airline (Fluggesellschaft)
ARR	Arrival (Ankunft)
ASK	Available Seat Kilometer (verfügbare Sitzkilometer)
ASSET	Aeronautical Study on Seamless Transport (Projekt)
ATA	Actual Time of Arrival (tatsächliche Ankunftszeit)
ATD	Actual Time of Departure (tatsächliche Abflugzeit)
ATC	Air Traffic Control (Flugsicherung)
ATM	Air Traffic Management (Luftverkehrsmanagement)
ATRS	Air Transport Research Society
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BoGS	Builder of Generic Schedules (Software-Modell)
CIA	Central Intelligence Agency
DEP	Departure (Abflug)
DIST	Distanz
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DORA	Door to Door Information for Airports and Airlines (Projekt)
EASA	European Aviation Safety Agency (Europäische Agentur für Flugsicherheit)
EDA	Explorative Datenanalyse
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FAA	Federal Aviation Administration
FB	Flugbewegung
FBA	Flugbewegungsanteil
FG	Fluggesellschaft
FGK	Fluggesellschaftsklasse
FH	Flughafen
FHK	Flughafenklasse
FoAM	Forecast of Aircraft Movements (Software-Modell)



FSNC	Full Service Network Carrier (Netzwerkfluggesellschaft)
GDS	Global Distribution System (Computerreservierungssystem von FG)
GLF	Gewichtsladefaktor
GOT	Gate Occupancy Time (Belegungszeit eines Gates durch ein LFZ)
IATA	International Air Transport Association
IAG	International Consolidated Airlines Group, S.A.
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IFR	Instrument Flight Rules (Instrumentenflugregeln)
IQR	Interquartilsabstand
IV	Individualverkehr
JMP	(Statistik-Software)
KI (CI)	Klasse (Cluster)
LCC	Low-Cost Carrier (ugs. Billigfluggesellschaft)
LFZ	Luftfahrzeug, hier: kommerzielles Passagierflugzeug
LOS	Level of Service (Servicequalität von Terminals)
LTS	Lufttransportsystem
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
LuftVStG	Luftverkehrssteuergesetz
LuftVZO	Luftverkehrszulassungsordnung
M	Median
MCT	Minimum Connecting Time (minimale Umsteigezeit)
MI	Mix Index (Verkehrsmix der FB)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MLM	Maximum Landing Mass (maximales Landegewicht)
MOV	Movement (Flugbewegung)
MTOM	Maximum Take-off Mass (maximal zulässige Startmasse)
MW	Mittelwert
NV	Normalverteilung
OD	Origin and Destination (Passagierroute)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PASSME	Personalised Airport Systems for Seamless Mobility and Experience (Projekt)
PAX	Passagier
PLF	Passagierladefaktor (auch Sitzladefaktor genannt)
Pkm	Passagierkilometer

POA	Point of Activity (Prozessstelle in Flughafenterminals)
Q	Quantil
QTI	Quality of Travel Index (Reisequalität)
RMSE	Root-Mean-Squared Error (Mittlerer quadratischer Fehler)
RPK	Revenue Passenger Kilometer (zurückgelegte Passagierkilometer)
RWY	Runway (Start- und Landebahn)
Sabre MI	Sabre Market Intelligence (Online Datenbank)
SEG	Segment (direkte Flugroute)
SLB	Start- und Landebahn
Skm	Sitzplatzkilometer
SLF	Seat Load Factor (Sitzladefaktor)
STA	Scheduled Time of Arrival (geplante Ankunftszeit)
STABW	Standardabweichung
STD	Scheduled Time of Departure (geplante Abflugzeit)
TAT	Turnaround Time (Abfertigungszeit eines LFZ)
Tkm	Tonnenkilometer
TWY	Taxiway (Rollbahn)
US	United States (Vereinigte Staaten von Amerika)
ULCC	Ultra-Low-Cost Carrier (ugs. Ultra-Billigfluggesellschaft)
VFR	Visual Flight Rules (Sichtflugregeln)
WLU	Work Load Unit (Arbeitseinheit)

## Symbolverzeichnis

$C$	Anteil der Wirbelschleppenategorie Medium am Verkehrsmix
$C_g$	Gate-Kapazität
$C^*$	Stündlicher Kapazitätsbasiswert
$\text{CO}_2$	Kohlendioxid
$D$	Anteil der Wirbelschleppenategorien Heavy und Super am Verkehrsmix
$d$	Distanz (Abstand)
$E$	Abrollfaktor ( <i>Exit Factor</i> )
$EX$	Erwartungswert
$f_j$	beobachtete Klassenhäufigkeiten
$f(x)$	Dichtefunktion
$F(x)$	Verteilungsfunktion
$G$	Grundgesamtheit
$H_0$	Nullhypothese
$H_A$	Arbeitshypothese
$h_j$	theoretische Klassenhäufigkeiten
$IG$	Intervallgrenze
$i$	Index
$Kb$	Klassenbreite
$Kz$	Klassenzahl
$k$	Positionsgruppe
$L_C$	Linke Datensequenz ( <i>L Method</i> )
$lb$	Pfund
$ld$	Logarithmus Dualis
$m$	Anzahl der aus der Stichprobe geschätzten Parameter
$m_i$	Anteil der LFZ der GOT-Klasse i im Verkehrsmix
$n$	Stichprobenumfang
$\text{NO}_x$	Stickoxide
$P, p$	Wahrscheinlichkeit
$QTI_{cha}$	QTI Flughafenentgelte ( <i>Charges</i> )
$QTI_{cnx}$	QTI Transferqualität ( <i>Connection</i> )
$QTI_{comf}$	QTI Komfort und Erlebnis ( <i>Comfort</i> )

$QTI_f$	QTI Flugfrequenz ( <i>Frequency</i> )
$QTI_{imod}$	QTI Intermodalität ( <i>Intermodality</i> )
$QTI_{punc}$	QTI Pünktlichkeit ( <i>Punctuality</i> )
$QTI_{tt}$	QTI Reisezeit ( <i>Travel Time</i> )
$q$	Parameter der Minkowski-Metrik
$R$	Range/Spanne der empirischen Daten
$R_C$	Rechte Datensequenz ( <i>L Method</i> )
$r$	Korrelationskoeffizient
$rg$	Rang
$s(i)$	Silhouettenkoeffizient
$\bar{s}_C$	Durchschnittlicher Silhouettenkoeffizient (über mehrere Cluster)
$s_x$	Standardabweichung von x
$T$	Durchstartfaktor ( <i>Touch &amp; Go Factor</i> )
$T_{gi}$	erforderliche GOT für LFZ der GOT-Klasse i
$w$	Parameter der <i>Minkowski</i> -Metrik
$\bar{x}$	Mittelwert von x
$\#$	Anzahl
$\emptyset$	Durchschnitt
$\{A\}$	Menge von A
$\{\Omega\}$	Menge aller möglichen Ereignisse
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\beta$	Gewichtungsfaktoren (beim QTI)
$\gamma_k$	Gate-Nutzungsfaktor der Positionsgruppe k
$\lambda$	Parameter der Exponentialverteilung, <i>Poisson</i> -Verteilung
$\varepsilon$	LFZ-Mix (im FoAM-Modell)
$\theta$	Parameter der <i>Weibull</i> -Verteilung
$\theta$	Schätzwert (bei Punkt- oder Intervallschätzungen)
$\mu$	Erwartungswert (der Standardnormalverteilung)
$\sigma^2$	Varianz (der Standardnormalverteilung)
$\varphi$	Parameter der <i>Weibull</i> -Verteilung
$\chi_{ber}^2$	Testgröße beim $\chi^2$ -Test

# 1 Einleitung

## 1.1 Flughäfen und Fluggesellschaften in Europa

Das Lufttransportsystem (LTS) ist ein komplexes, interaktives und sich ständig veränderndes System<sup>1</sup>. Dessen Stakeholder unterliegen einer permanenten Anpassung an neue Trends, Technologien und staatliche Regularien. Die Herausforderung für jeden einzelnen Stakeholder besteht darin, sich zielgerichtet und effizient an diese Veränderungen anzupassen und sich gleichzeitig von der Konkurrenz abzuheben.

Eine der aktuellen Herausforderungen für europäische *Hub*-Flughäfen liegt im eingeschränkten Wachstum ihrer Kapazitäten, so dass sie an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen. Vor allem in den Spitzenstunden kann die Nachfrage der Fluggesellschaften nach Start- und Landeslots nicht mehr befriedigt werden. Dies gilt z. B. für die Drehkreuze europäischer Fluggesellschaften, wie der Flughafen *London Heathrow* (LHR<sup>2</sup>) von *British Airways*, der Flughafen *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) von *Air France* oder auch der Flughafen *München* (MUC) von *Lufthansa* [1]. Folglich bilden sie permanente Engstellen im europäischen LTS. Einige dieser *Hub*-Flughäfen sind über die Jahre gewachsen und weisen teilweise jahrzehntealte Infrastrukturen auf. Erweiterungsmaßnahmen sind aufgrund fehlender Flächen nahezu unmöglich oder werden, vor allem in Deutschland, rechtlich und öffentlichkeitswirksam bekämpft (z. B. 3. Start- und Landebahn (SLB) am Flughafen *München* (MUC) [2], [3] oder SLB-Verlängerung am Flughafen *Münster-Osnabrück* (FMO) [4]). Dennoch soll der Luftverkehr in Europa auch in den kommenden Jahren durchschnittlich um 3,5 %<sup>3</sup> jährlich wachsen [5] S. 56. Infolgedessen wird die Anzahl der Flugbewegungen (FB) über Europa bis 2024 auf 12,4 Mio.<sup>4</sup> anwachsen [6]. Um diese steigende Nachfrage weiter zu befriedigen, werden immer größere Luftfahrzeuge (LFZ) eingesetzt, um eine größere Anzahl von Passagieren mit nur einer Flugbewegung zu transportieren ([7], vgl. Abbildung 3-12). Infolgedessen können wertvolle Transportkapazitäten ohne Flughafenausbau generiert werden.

In den arabischen und asiatischen Märkten wird im Vergleich zu Europa ein noch stärkeres Wachstum prognostiziert ([8], [9]). Bereits heute verschärft sich der Wettbewerb durch Konkurrenten aus dem mittleren Osten. In Istanbul wird ein Flughafen mit einer geplanten Kapazität (im vollen Ausbauzustand) von jährlich 150 Mio. Passagieren sowie 6 SLB gebaut [10]. Ebenso treibt das Emirat Dubai den Ausbau seines Luftverkehrsdrehkreuzes stetig voran. In Europa mit dieser Entwicklung Schritt zu halten, wird jedoch sowohl durch die oben genannten Kapazitätsengpässe als auch durch staatliche Regularien, wie z. B. der Luftverkehrssteuer<sup>5</sup> in Deutschland, erschwert.

---

<sup>1</sup> Auf den Systembegriff wird in Kapitel 3.1 näher eingegangen.

<sup>2</sup> IATA *3-Letter-Code* für Flughäfen. Eine Suchfunktion ist unter [www.world-airport-codes.com](http://www.world-airport-codes.com) zu finden, zuletzt geprüft am 20. Februar 2018.

<sup>3</sup> Gemessen in *Revenue Passenger Kilometer* (RPK) *Traffic Growth*.

<sup>4</sup> Flugbewegungen nach *Instrumental Flight Rules* (IFR) im *Base Szenario*, es werden 13,7 Mio. IFR Flugbewegungen im *High Szenario* und 11,3 Mio. IFR Flugbewegungen im *Low Szenario* angenommen.

<sup>5</sup> Auf Grundlage des *Luftverkehrssteuergesetzes* (LuftVStG) vom 9. Dezember 2010.

Auch die innereuropäische Konkurrenz unter den Flughäfen hat aufgrund der weitreichenden Veränderungen des europäischen Marktes innerhalb der letzten 20 Jahre zugenommen. Fluggesellschaften und Passagiere sind ungebundener und haben die Möglichkeit einen anderen Flughafen zu nutzen<sup>6</sup>, so dass ein kommerziell orientiertes Verhalten (unter anderem Preissteigerungen) seitens der Flughäfen nur in beschränktem Maße möglich ist und die Marktmacht der Flughäfen abnimmt [11]. Andererseits ist der Wechsel eines Flughafens für die Fluggesellschaft mit Kosten verbunden und bei *Hub*-Fluggesellschaften sind die Netzwerkeffekte (z. B. Umsteigepassagiere) zu beachten. Des Weiteren präferieren Passagiere ihren lokalen Flughafen [12] S. 5 f.

Nicht nur Flughäfen, sondern auch Fluggesellschaften in Europa haben mit neuen Herausforderungen zu kämpfen. Die einst etablierten Netzwerkfluggesellschaften (z. B. *Lufthansa*, *British Airways* und *Air France*), auch als *Full Service Network Carrier* (FSNC) bezeichnet, stehen massiv im Wettbewerb mit den *Low-Cost Carrier* (LCC), vor allem auf ihren innereuropäischen Märkten<sup>7</sup>. Folglich sinken ihre Umsätze und Gewinne<sup>8</sup>, da ein hoch spezialisierter Verwaltungsapparat notwendig ist um die komplexen<sup>9</sup> und stark vernetzten internen Strukturen zu managen [14] S. 5. Des Weiteren ist im Vergleich zu LCC die Personaldichte in allen Servicebereichen<sup>10</sup> größer, mit der Folge von höheren Personalkosten [14] S. 4. Eine Anpassung an neue Marktsituationen kann somit nur langsam erfolgen. Um ein übermäßiges Abwandern der Passagiere zu verhindern, gründeten die Netzwerkfluggesellschaften ihrerseits *Low-Cost* Tochterunternehmen<sup>11</sup> (z. B. *Lufthansa* mit *German*- bzw. *Eurowings* und *Air France* mit *HOP!*).

Aber auch auf die Langstreckenrouten mit Start in Europa drängen gezielt Fluggesellschaften aus dem mittleren Osten, unter anderem *Turkish Airlines*, *Emirates* und *Etihad Airways*. Diese Fluggesellschaften bieten Flüge nach Südostasien bzw. in den pazifischen Raum zu günstigen Ticketpreisen an. Zwischenstopps an ihren *Hub*-Flughäfen sind entweder kurz oder gezielt auf einen mehrtägigen Zwischenstopp ausgelegt. Weiterhin betreiben sie moderne Flotten, bieten einen hochwertigen Service und unterliegen im Vergleich zu ihren europäischen Konkurrenten insgesamt weniger ökonomischen (z. B. Steuern oder Sozialabgaben) und ökologischen (z. B. Lärm- und Emissionsentgelte an Flughäfen) Zwängen [18], [19]. Im Zuge dessen wurden auch auf den Langstrecken *Low-Cost* Produkte (z. B. *Norwegian Air Shuttle* in 2013, *Eurowings* in 2015, *LEVEL*<sup>12</sup> und *Joon*<sup>13</sup> in 2017) eingeführt und dieses Angebot wird seitdem kontinuierlich erweitert [20], [21], [22], [23], [24], [25].

Diese *Low-Cost* Entwicklung ist nicht nur in Europa zu beobachten, sondern weltweit [26]. Im asiatisch-pazifischen Raum ist der Marktanteil des LCC *AirAsia Berhad* von 2012 bis 2016

---

<sup>6</sup> Z. B. haben durchschnittlich die Hälfte aller abfliegenden Passagiere auf innereuropäischen Routen die Wahl zwischen mehr als einem, angemessen attraktiven Alternativflughafen für ihre Reise [11] S. 5.

<sup>7</sup> Aktuelle Entwicklungstrends ausgewählter europäischer Fluggesellschaften werden von *Kölker et al.* [13] diskutiert.

<sup>8</sup> Auch infolge fortschreitender *Yield-Erosion* [14] S. 8.

<sup>9</sup> Durch Kooperationen mit anderen Airlines wird diese Komplexität weiter verstärkt [14] S. 5, [15] 133 ff.

<sup>10</sup> Mehr fliegerisches Personal (Piloten/Co-Piloten), Anzahl der Kabinenbesatzung über den sicherheitstechnischen Standards, weltweite Stationen mit eigenem Personal.

<sup>11</sup> Dieses Konzept wird auch *Airlines-within-Airlines* (AWA) genannt [16], [17].

<sup>12</sup> *LEVEL* ist eine Tochtergesellschaft der *International Consolidated Airlines Group, S.A.* (IAG).

<sup>13</sup> *Joon* ist die Mittel- und Langstreckentochter von *Air France*.

stetig gewachsen [27]. *AirAsia*<sup>14</sup> hat bereits weitere Bestellungen über mehrere hundert *Airbus A320neo* in Auftrag gegeben [28], so dass in Zukunft mit einem weiteren Wachstum von *AirAsia* zu rechnen ist. Ähnlich erfolgreich im asiatisch-pazifischen Raum ist der australische LCC *Jetstar*<sup>15</sup> [29]. Im US-amerikanischen Markt, wo in den 1980er Jahren die LCC aufkamen, nähern sich die etablierten LCC, wie *Southwest Airlines* und *JetBlue Airways*, in bestimmten Bereichen mehr und mehr den FSNC an, so dass sogenannte *Ultra-Low-Cost Carrier (ULCC)*<sup>16</sup> im letzten Jahrzehnt in den Markt drängten. Diese unterbieten aufgrund niedriger Kosten auch die Preise der etablierten LCC und erwirtschaften hohe Nebeneinkünfte durch konsequente Produktdifferenzierung<sup>17</sup> [30].

In Europa rückt der Luftverkehr immer weiter in den Fokus der Öffentlichkeit. Technische und operative Innovationen werden verlangt, um nachteilige Umweltauswirkungen des Luftverkehrs, vor allem Lärm- und Schadstoffemissionen, zu reduzieren [31]. Politik und Industrie haben sich im Rahmen von *Europe's Vision for Aviation - Flightpath 2050* [32] unter anderem zum Ziel gesetzt, die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 75 % und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 90 % im Vergleich zum Jahr 2000 zu senken. Um einerseits diese umweltpolitischen Ziele erreichen zu können und andererseits die zukünftige Weiterentwicklung des europäischen LTS zu ermöglichen, sind Forschung und Entwicklung im Bereich des LTS wichtig.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an, diese heterogene Flughafenlandschaft vor allem auf quantitativer Ebene zu analysieren und nicht nur eine europäische, sondern eine weltweite *Flughafentopologie* zu entwickeln. Dazu wird eine generische Modellierung angestrebt, die zur Senkung der Komplexität bei Modellierungen des globalen LTS führen kann.

Auf Basis der Ergebnisse können auf einem einfacheren und effizienteren Weg überregionale und globale Wachstumsszenarien analysiert werden. Dies mündet in strategischen Analysen und Trendszenarien über die Entwicklung des zukünftigen LTS. Das heißt beispielweise, inwieweit Flughäfen ein zukünftiges Wachstum der Passagier- und Flugbewegungsnachfrage überhaupt bewältigen können. Das folgende Kapitel geht detaillierter auf Ziele und Motivation dieser Arbeit ein.

## 1.2 Zielsetzung und Motivation

Ziel dieser Arbeit ist, die Machbarkeit der Modellierung von parametrischen bzw. generischen Flughäfen zu prüfen und somit globale Flughafenetze mit beschränktem Aufwand und repräsentativer Aussagekraft aufbauen zu können. Viele Forschungsstudien im Bereich des Luftverkehrs zielen auf zukünftige Entwicklungen des globalen LTS ab, wobei selten ein einzelner Flughafen oder eine einzelne Fluggesellschaft, sondern die Entwicklung einer Region im Vordergrund steht. Auch aus politischen Gründen ist oft nicht erwünscht, einen spezifischen Flughafen oder eine spezifische Fluggesellschaft zu verwenden.

---

<sup>14</sup> Zu *AirAsia Berhad* gehören die Tochtergesellschaften *AirAsia (X)*, *Thai AirAsia (X)*, *Indonesia AirAsia (X)*, *Philippines AirAsia*, *AirAsia Japan*, *AirAsia India*, *AirAsia Vietnam* und *AirAsia China*.

<sup>15</sup> Zu *Jetstar Airways Pty Ltd*, kurz *Jetstar*, gehören die Tochtergesellschaften *Jetstar Airways*, *Jetstar Asia Airways*, *Jetstar Pacific Airlines* und *Jetstar Japan*. *Jetstar* ist wiederum eine 100 %-ige Tochtergesellschaft von *Qantas Airways Limited*.

<sup>16</sup> Hierunter zählen *Bachwich & Wittmann* z. B. *Allegiant Air*, *Spirit Airlines* und *Frontier Airlines* [30].

<sup>17</sup> Nur der reine Flug ist im Ticketpreis enthalten. Check-in am Schalter, priorisiertes Einsteigen ins Luftfahrzeug, Sitzplatz, Gepäck und Essen bzw. Getränke an Bord können gegen Gebühr erworben werden.

Da Flughäfen nur ein Teil des LTS abbilden, ist ebenso die Einbeziehung von flughafennahen Elementen wichtig. Im Kontext dieser Arbeit wird dabei auf die generische Modellierung von Fluggesellschaften, einem der wichtigsten Kunden der Flughäfen, sowie des Flugplans, dem verbindenden Element zwischen den beiden genannten Stakeholdern, eingegangen. Beide beeinflussen die operationellen Abläufe und die ökonomische Entwicklung von Flughäfen.

Es wird ein generischer Ansatz verfolgt, unter der Prämisse: *So genau wie nötig, so grob wie möglich*. Das heißt, der Definition von generisch folgend [33], dass sich ein materielles oder abstraktes Objekt bzw. insbesondere ein Begriff auf eine ganze Klasse, Gattung oder Menge anwenden lässt oder stellvertretend dafür steht. Infolgedessen mündet die Arbeit in sogenannten *Flughafenklassen* respektive *Flughafenrepräsentanten*.

Auf Basis derer wird anschließend untersucht, inwieweit eine quantitative Substitution von realen Flughäfen durch Flughafenrepräsentanten in wissenschaftlichen Fragestellungen Auswirkungen auf deren Ergebnisse haben.

Folgende *Forschungsfragen* werden in dieser Arbeit thematisiert:

- *Inwieweit lassen sich Flughafenklassen bilden und welche charakteristischen Eigenschaften besitzen verschiedene Klassen von Flughäfen? Wie sehen auf dieser Basis geeignete Repräsentanten dieser Flughafenklassen aus?*
- *Welche flughafennahen Elemente des LTS werden zusätzlich für eine hinreichende Modellierung von generischen Flughäfen benötigt, um sowohl deren operationelle und ökonomische IST-Situation als auch eine zukünftige Entwicklung von Flughäfen adäquat zu modellieren?*
- *Wie groß ist die Abweichung zu einer spezifischen Betrachtung von Einzelflughäfen auf einer aggregierten Ebene? Wie stabil sind die gefundenen Flughafenklassen?*

Spezifische Modellierungen sind auf ein bestimmtes Element ausgerichtet, z. B. im Kontext der Flughafenmodellierung auf die Start- und Landbahnkapazität eines Flughafens. Infolge der Adaption auf einen konkreten Anwendungsfall, z. B. die Auswirkungen des *Continuous Descent Approach* am Flughafen *Frankfurt/Main* [34], sind detaillierte Aussagen über Kapazitätsentwicklungen an einem spezifischen Flughafen möglich. Hierfür verwendete (Software-) Werkzeuge sind jedoch oft umfangreich, bedürfen einer hohen Datenverfügbarkeit und sind rechen- sowie zeitintensiv. Im Kontext von globalen Fragestellungen zum LTS ist die Nutzung eher nachteilig, da umfangreiche Daten erst beschafft werden müssen oder gar nicht verfügbar sind (z. B. für Schwellen- und Entwicklungsländer).

Die Motivation hinter einer generischen Modellierung ist folglich in erster Linie die Senkung der Komplexität im Vergleich zu einer mikroskopischen Modellierung, die in der Regel spezifisch, das heißt für einen Flughafen bzw. ein Flughafenelement, ist. Da ein Objekt stellvertretend für eine ganze Klasse steht, ist eine einfache und allgemeine Anwendbarkeit gegeben. Dadurch wird eine effiziente Modellierung von regionalen und globalen Netzwerkeffekten unterstützt. Die Repräsentanten (hier Flughäfen/Fluggesellschaften) bedürfen von Zeit zu Zeit einer Aktualisierung. Eine spezifische Modellierung jedes einzelnen Flughafens innerhalb von globalen Netzszenarien entfällt. Ein weiterer Vorteil von generischen Objekten, der sich durch die geringere Komplexität ergibt, liegt in einer vereinfachten Prognosefähigkeit.



Die Herangehensweise und Zielstellung dieser Arbeit wird durch die Sichtweise auf das gesamte LTS charakterisiert. Das spezifisch, reale Verhalten individueller Flughäfen ist in diesem Fall nicht von Interesse. Somit erfolgt ein Abstrahieren und bewusstes Weglassen von einzelnen, spezifischen Elementen, da das globale bzw. Netzwerkverhalten im Vordergrund steht. Eine bestimmte Unschärfe wird bewusst akzeptiert, wobei dennoch die Abbildung eines arttypischen Verhaltens gegeben sein muss. Flughäfen werden auf ein Minimum von Merkmalen reduziert, da Datenressourcen nur begrenzt bzw. gegen hohe Entgelte verfügbar sind.

Die Anwendung der generisch modellierten Elemente wird an verschiedenen Beispielen aufgezeigt. Unter Verwendung der modellierten Flughafenklassen respektive -repräsentanten sind kapazitive Trendaussagen für reale Flughäfen des LTS sowie des Flugnetzes zwischen den Flughäfen unter Einbeziehung von Quell- und Zielverkehren möglich. Zentraler Ansatzpunkt für solche Analysen ist das Ersetzen der realen Flughäfen durch die Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse. Der Modellierungsaufwand reduziert sich dabei erheblich, da nicht mehr auf die einzelnen Flughäfen und deren Merkmale zurückgegriffen werden muss, sondern die Flughafenrepräsentanten genutzt werden können.

Weiterhin ergeben sich auf Basis der Merkmale von Flughafenklassen bzw. -repräsentanten Möglichkeiten zur differenzierten Modellierung von Routenwahlmodellen. Näher eingegangen wird auf die Reisequalität von Passagieren und inwieweit Merkmale der Intermodalität oder des Komforts von Flughäfen in die Routenwahlmodelle einbezogen werden können.

Zusammenfassend werden aus einer makroskopischen Perspektive Flughäfen sowie weitere, flughafennahe Elemente des LTS generisch abgebildet. Die Ergebnisse liefern einen Beitrag zur qualitativen und quantitativen Beschreibung unterschiedlicher Ausprägungen eines Flughafens auf Basis festgelegter Merkmale und zeigen auf, inwieweit dieses Vorgehen im Vergleich zur Nutzung von Realdaten abweicht.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

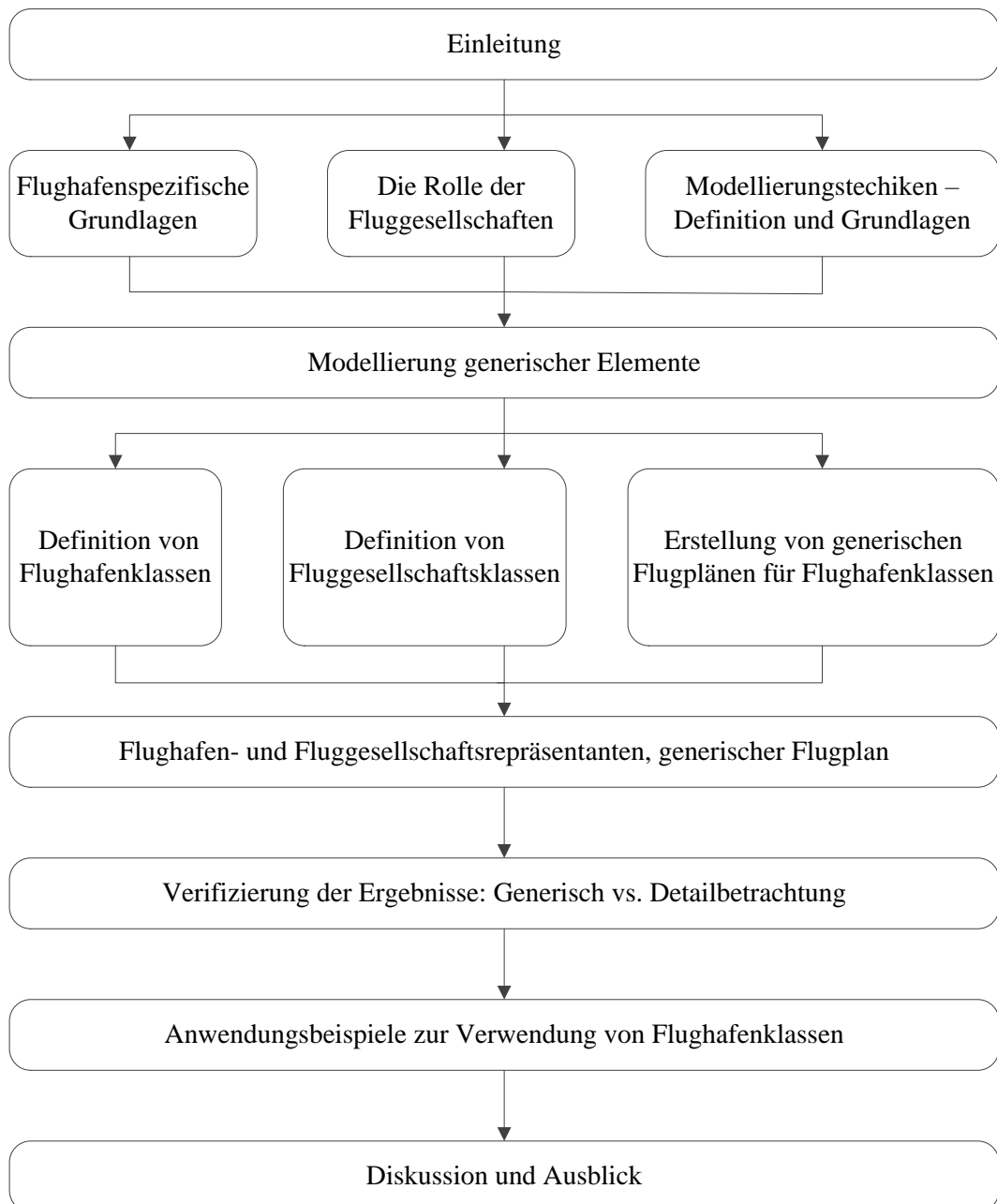
Die Arbeit gliedert sich in sieben inhaltliche Kapitel (vgl. Abbildung 1-1). Nach dem einleitenden Kapitel 1, das die Ziele und die Motivation der Arbeit dargelegt, wird in Kapitel 2 auf flughafenspezifische Grundlagen näher eingegangen. Der Fokus liegt auf der Rolle des Stakeholders Flughafen innerhalb des globalen LTS als Verkehrsknotenpunkt respektive als kommerziell agierendes Unternehmen. Des Weiteren ist der aktuelle Stand der Wissenschaft, vor allem bezüglich der Modellierung der operationellen Leistungsfähigkeit von Flughäfen, Inhalt dieses Kapitels. Das Kapitel schließt mit der Erläuterung des neuen Modellansatzes dieser Arbeit (Kapitel 2.5).

Um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen werden verschiedene Modellierungstechniken benötigt, die in Kapitel 3 behandelt werden. Eine entscheidende Technik ist dabei die Clusteranalyse (Kapitel 3.2). Das Ziel ist die Ausprägung einer Gruppe von Flughäfen mit homogenen, charakteristischen Merkmalen und gleichzeitig heterogen Merkmalen im Vergleich mit anderen Gruppen bzw. Klassen. Weiterhin werden statistische Methoden in Bezug auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen erläutert (Kapitel 0), die in Kapitel 4.5 zur Erstellung von generischen Flugplänen für die Flughafenklassen benötigt werden. Schließlich wird auf Prognosemethoden zur zukünftigen Entwicklung von einzelnen flughafenspezifischen Merkmalen näher eingegangen (Kapitel 3.4). Besonders das Wachstum des Passagervolumens

(Kapitel 3.4.1) und der Flugfrequenzen (Kapitel 3.4.2) ist von Interesse, da beide maßgeblich den Betrieb eines Flughafens beeinflussen.

Inhalt von Kapitel 4 ist die Modellierung von generischen Flughäfen, welche insgesamt fünf Schritte umfasst. Erster Schritt ist die Definition von Flughafenklassen mittels einer Clusteranalyse (Kapitel 4.2), aus denen sich sogenannte Klassenrepräsentanten ableiten, die sowohl quantitativ als auch qualitativ beschrieben werden. Kapitel 4.3 widmet sich der Definition von Fluggesellschaftsklassen, wobei der gleiche methodische Ansatz wie in Kapitel 4.2 zur Anwendung kommt. Auf Basis der modellierten Fluggesellschaftsklassen werden die Flughafenklassen weiter spezifiziert. Im Anschluss daran werden die Kosten und Erlöse der Flughafenklassen (Kapitel 4.4) sowie weitere wichtige Flughafenelemente (Kapitel 4.6) betrachtet. Um betriebliche Prozesse zwischen Flughafen und Fluggesellschaft zu modellieren, bedingt es einen Flugplans. Dessen Ausprägung in einer generischen Form für die modellierten Flughafenklassen wird in Kapitel 4.5 thematisiert.

Die erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 5 verifiziert, indem Realdaten und die generisch erzeugten Parameterwerte für begrenzte Regionen miteinander verglichen werden. Hierbei wird auf die Regionen Deutschland, Nordamerika und Ostasien näher eingegangen. Nachfolgend behandelt Kapitel 6 mehrere Anwendungsbeispiele, wie Flughafenklassen eingesetzt werden können. Kapitel 7 fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf die potenzielle Weiterentwicklung des Themas.



**Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit.**

## 2 Flughafenspezifische Grundlagen

Dieses Kapitel beinhaltet ausgewählte flughafenspezifische Erläuterungen, mit dem Ziel grundlegende Begrifflichkeiten und Zusammenhänge in Bezug auf das Thema der Arbeit zu vermitteln. Zunächst erfolgt die Einordnung des Stakeholders Flughafen in den Gesamtkontext des LTS (Kapitel 2.1). Daran anschließend wird im Kapitel 2.2 auf die Rolle des Flughafens als Verkehrsknotenpunkt eingegangen, ehe in Kapitel 2.3 die betriebswirtschaftlichen Aspekte eines Flughafens im Vordergrund stehen. Abschließend gibt Kapitel 2.4 einen Überblick über die Rolle der Fluggesellschaften für Flughäfen.

### 2.1 Bedeutung und Entwicklung von Flughäfen im Lufttransportsystem

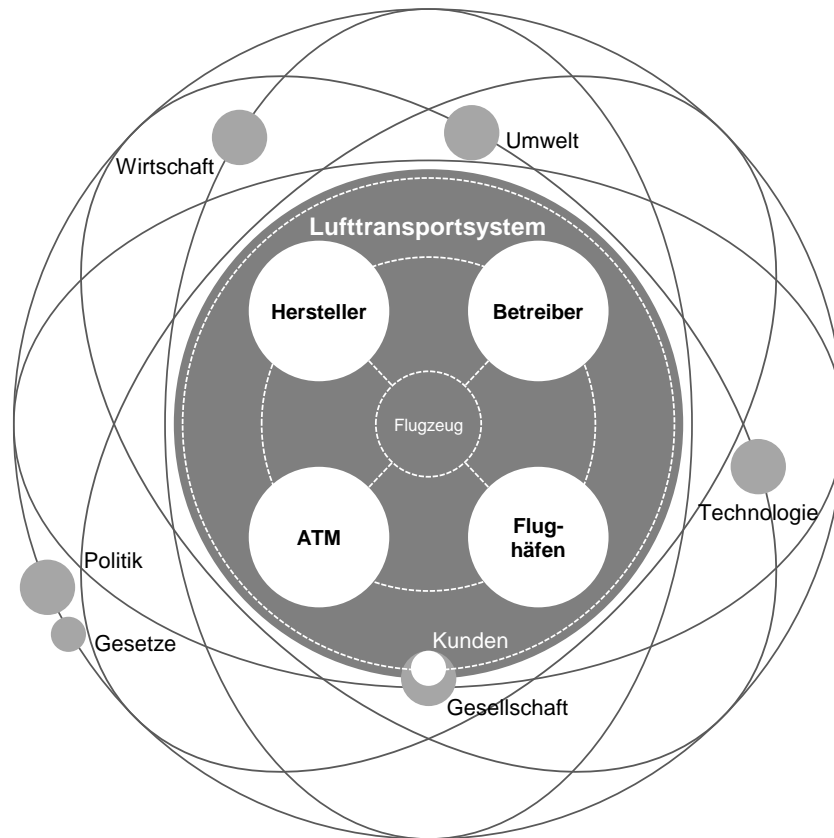
Das LTS schließt die Gesamtheit aller Vorgänge ein, die einer Ortsveränderung von Personen, Gütern und Nachrichten (Personen, Fracht und Post) auf dem Luftweg dienen [35] S. 6. Es lässt sich in vier Teilsysteme, den Hersteller von LFZ, den Betreiber (die Fluggesellschaft), das *Air Traffic Management* (ATM, Luftverkehrsmanagement) und den Flughafen, untergliedern. Das Element, das diese Teilsysteme miteinander verbindet, ist das LFZ. Unterstützt, getrieben und restringiert werden diese Stakeholder von verschiedenen, externen Entitäten: der Wirtschaft, der Umwelt, der Technologie, der Politik (inkl. Gesetzen) und der Gesellschaft. Der Kunde bzw. Passagier einer Fluggesellschaft ist ein Teil der Gesellschaft (siehe Abbildung 2-1).

Flughäfen bilden die Quellen und Senken von Flügen, der Dienstleistung von Fluggesellschaften, im LTS mit entsprechender organisatorischer, technischer<sup>18</sup> und betrieblicher Infrastruktur [35] S. 10, wobei letztgenanntes entscheidende Merkmale von Flughäfen umfasst. Infrastrukturen, wie z. B. SLB, Rollwege (*Taxiways*) und Terminals, besitzen spezifische, von der jeweiligen Infrastruktur abhängige Kapazitäten und sind folglich potenzielle Engstellen im LTS. In Europa können die vorhandenen Infrastrukturen aufgrund von flughafennaher Bebauung sowie gesellschaftspolitischen Entwicklungen der letzten Jahre kaum oder gar nicht erweitert werden. Besonders Ausbaumaßnahmen deutscher Flughäfen ziehen sich durch Gerichtsverfahren gegen die Planfeststellungs- und Raumordnungsverfahren<sup>19</sup> oft über Jahre in die Länge. Beispiele hierfür sind die 4. SLB am Flughafen *Frankfurt/Main* (FRA), die 3. SLB am Flughafen *München* (MUC) und der Neubau des Flughafens *Berlin Brandenburg* (BER). Hierdurch und durch umfangreiche Nachtflugeinschränkungen und -verbote entwickelt sich zunehmend ein Wettbewerbsnachteil für die Flughäfen [36]. Im Gegensatz dazu sind weltweit mehrere Flughafenerweiterungen und -neubauten in Planung, unter anderem in Dubai [37], Peking [38], [39] oder Mexiko-Stadt [40]. Istanbul hat 2019 ebenso den Bau eines neuen Flughafens abgeschlossen. Dieser soll im Endausbauzustand eine geplante Kapazität von 150 Mio. Passagieren erreichen und 6 SLB besitzen [10].

---

<sup>18</sup> Technische Infrastruktur umfasst am Flughafen alle Anlagen, die zur Energieversorgung und Kommunikation (Internet, Festnetz, Mobilfunk) dienen, unter anderem Radar- und Navigationsanlagen, Beleuchtung, Klimaanlage, etc.

<sup>19</sup> Flugplätze dürfen nach § 6 LuftVG nur mit Genehmigung angelegt und betrieben werden. Im Genehmigungsverfahren, das einer Planfeststellung bedarf, ist die Umweltverträglichkeit zu prüfen und ob die geplante Maßnahme den Erfordernissen der Raumordnung entspricht.



**Abbildung 2-1: Modell des Lufttransportsystems - Stakeholder und externe Entitäten [41].**

Dieser Flughafen kann sich dadurch und aufgrund der besseren geoglobalen Lage zu einem direkten Konkurrenten zu den anderen zentraleuropäischen Luftverkehrsdrehkreuzen, wie den Flughäfen *Frankfurt/Main* (FRA), *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) oder *London Heathrow* (LHR), entwickeln. [42]

Parallel zu den etablierten Flughäfen entwickelten sich in den letzten Jahrzehnten speziell auf die Bedürfnisse der sogenannten LCC ausgerichtete Flughäfen. Möglich geworden ist dies erst durch die Deregulierung des Luftverkehrsmarktes. Zunächst öffneten 1978 die USA den bis dahin abgeschotteten Luftverkehrsmarkt<sup>20</sup>. Neuen Fluggesellschaften ermöglichte dies einen einfacheren Zugang zu bisher wenig beflogenen Strecken als auch Strecken der etablierten Fluggesellschaften. Weiterhin wurden die Festtarife für Strecken abgeschafft und ab 1983 den Unternehmen die Preisgestaltung völlig freigestellt. [43] S. 205 ff

Gleiches vollzog sich in Europa. Seit 1987 wurden mehrere Gesetzespakete<sup>21</sup> zur Liberalisierung des Luftverkehrs durch die *Europäische Wirtschaftsgemeinschaft* (EWG) verabschiedet. Ab 1993 ist die Erteilung einer Betriebserlaubnis für Fluggesellschaften harmonisiert worden und die Preisfindung für Sitztarife, Charterpreise und Frachtraten wurden völlig freigegeben. Weiterhin besitzen seit April 1997 alle Fluggesellschaften der *Europäischen Gemeinschaft* (EG) das Recht, auf allen Strecken Verkehrsrechte zu beantragen<sup>22</sup>. Diese politische Entwicklung erhöhte den, vorher durch hohe Ein- und Austrittsbarrieren nicht vorhandenen, Wettbewerb im

<sup>20</sup> Auf Basis des *Airline Deregulation Act* (ADA).

<sup>21</sup> Unter anderem Verordnungen (EWG) Nr. 3975/87, Nr. 2671/88, Nr. 2672/88, Nr. 2673/88, Nr. 2343/90.

<sup>22</sup> Unter anderem Verordnungen (EWG) Nr. 2407/92, Nr. 2408/92, Nr. 2409/92.

Luftverkehr<sup>23</sup> [43] S. 99 ff. Es ergaben sich zahlreiche Möglichkeiten für europäische Fluggesellschaften, Flüge von und zu allen Staaten der EG anzubieten und auch wieder aufzugeben, so dass die Fluggesellschaften flexibel auf Veränderungen reagieren konnten [11] S. 2.

Ein weiterer, sich abzeichnender Trend ist die Entwicklung von Flughäfen hin zu *Airport Cities* [45]. Das heißt, der Flughafen bietet in seiner direkten Umgebung Grundstücke an, die für die Öffentlichkeit zugänglich sind. So entstehen verschiedenartige Komplexe, unter anderem Büros, Geschäfts- und Konferenzzentren, Shoppingcenter sowie Vergnügungsareale. Beispiele hierfür sind die Flughäfen *London Heathrow* (LHR), *Hongkong Chek Lap Kok* (HKG) und *Seoul Incheon* (ICN) [45] S. 19 ff. In Zukunft könnten sich sogenannte *Aerotropolis* entwickeln, wobei der Flughafen ins Zentrum der Stadt rückt und sich nicht nur luftfahrtnahe Geschäftszweige ansiedeln, sondern auch assoziierte Wohnbebauung. *Kasarda* [46] zufolge ist dies eine logische Entwicklung. Heutige urbane Zentren befinden sich in direkter Umgebung zu den früher verkehrsreichsten Bahnhöfen, morgige werden an den verkehrsreichsten Flughäfen sein. Der Flughafen *Amsterdam Schiphol* (AMS) ist *Kasarda* zufolge ein gutes Beispiel für eine *Aerotropolis*.

## 2.2 Der Flughafen als Verkehrsknotenpunkt

Generell kann ein Flughafen in eine Land- und Luftseite sowie den Terminalbereich als verbindendes Element eingeteilt werden [35] S. 275. Der Betreiber eines Flughafens schafft hierfür die räumlichen- und betrieblichen Voraussetzungen und stellt diese gegen Entgelt zur Verfügung [35] S. 314.

Flughäfen können nach § 38 Abs.2 LuftVZO als Flughäfen des allgemeinen Verkehrs (Verkehrsflughäfen) oder als Flughäfen für besondere Zwecke (Sonderflughäfen) eine Betriebsgenehmigung erhalten. Flughäfen bedürfen, im Gegensatz zu Landeplätzen und Segelfluggeländen, nach § 12 LuftVG eines Bauschutzbereichs in dem die Errichtung von Bauwerken im Umkreis von 1,5 km Halbmesser um den Flughafenbezugspunkt nur mit Zustimmung der Luftfahrtbehörde erlaubt ist. In Deutschland werden Flughäfen, Landeplätze und Segelfluggelände nach § 6 LuftVG unter dem Oberbegriff Flugplätze zusammengefasst (siehe Abbildung 2-2).

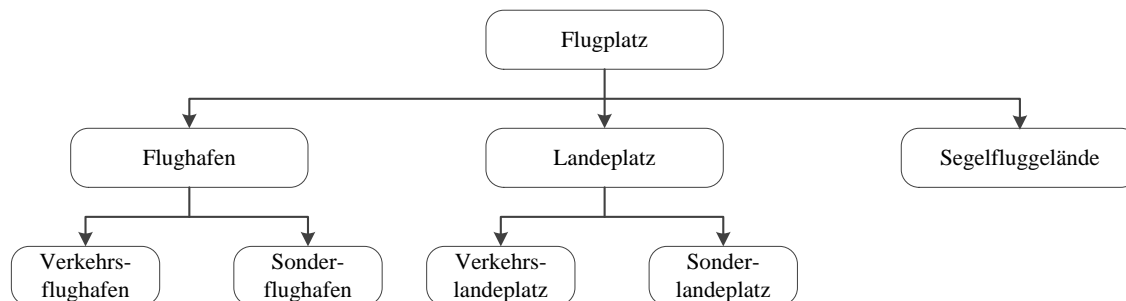


Abbildung 2-2: Einteilung von Flugplätzen nach LuftVG, in Anlehnung an [47].

<sup>23</sup> Im Mai 2016 haben auch die ASEAN-Länder (Brunei, Kambodscha, Indonesien, Laos, Malaysia, Myanmar, Philippinen, Singapur, Thailand und Vietnam) ihre Lufträume gegenseitig freigegeben [44].

**Tabelle 2-1: Einteilung von Flughäfen nach ICAO, in Anlehnung an [48] S. 1-12.**

Code-Element 1		Code-Element 2		
Code-Zahl	Bezugsstartbahnlänge in [m]	Code-Buchstabe	Spannweite in [m]	Hauptfahrwerksbreite in [m]
1	< 800	A	< 15	< 4,5
2	800 - <1200	B	15 - < 24	4,5 - < 6
3	1200 - < 1800	C	24 - < 36	6 - < 9
4	> 1800	D	36 - < 52	9 - < 14
		E	52 - < 65	9 - < 14
		F	65 - < 80	14 - <16

Die *International Civil Aviation Organisation* (ICAO) unterteilt Flughäfen mittels eines Flugplatzbezugscodes (*Aerodrome Reference Code*), der aus zwei Elementen besteht (siehe Tabelle 2-1). Erstens Element ist eine *Code-Zahl*, die die Bezugsstartbahnlänge eines Flughafens widerspiegelt. Das zweite Element ist ein *Code-Buchstabe*, der angibt, welche Flugzeuge den entsprechenden Flughafen nutzen können, wobei sich auf verschiedene Spannweiten bzw. Hauptfahrwerksbreiten der Flugzeuge bezogen wird. [48] S. 1-12

### 2.2.1 Flughafen-Landseite und Intermodalität

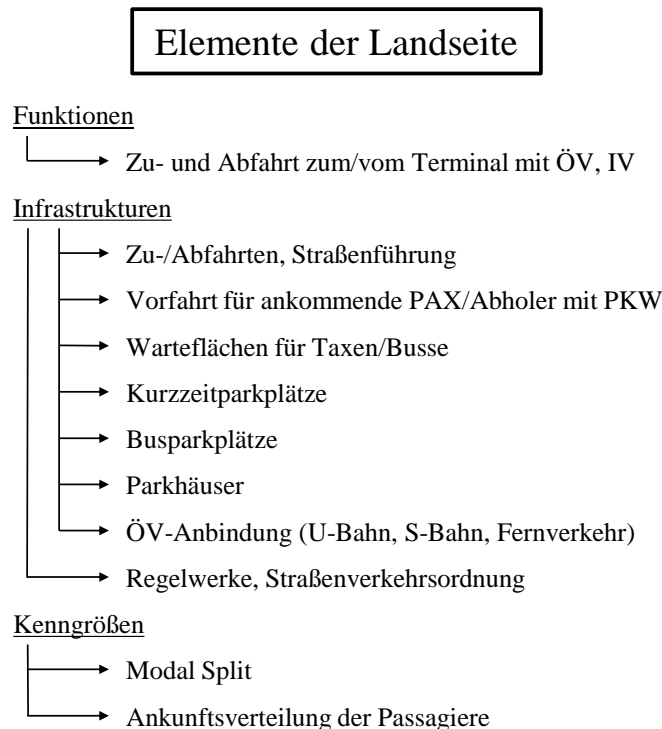
Die Landseite eines Flughafens umfasst die Anbindung an die örtliche, bodengebundene Infrastruktur und dient als Schnittstelle zwischen den verschiedenen Transportmodi. Ankommende bzw. abfliegende Passagiere und Fracht sollen schnell und mit möglichst wenig Umstiegen zu ihrem Ziel bzw. von ihrem Startpunkt der Reise zum Flughafen gelangen. Die wesentlichen Infrastrukturen und Funktionen der Flughafen-Landseite zeigt Abbildung 2-3. In Bezug auf Gestaltung und Dimensionierung<sup>24</sup> der Infrastrukturen sind unter anderem Einflussfaktoren wie das Verkehrsaufkommen, die Terminalanordnung, die regionale Anbindung und das Geschäftsmodell des Flughafens zu beachten [49] S. 112. Hieraus leiten sich auch wichtige Kenngrößen wie der *Modal Split*<sup>25</sup> und typische Ankunftsverteilungen der Passagiere am Flughafen ab.

Die Intermodalität hat eine zunehmend wichtigere Bedeutung für Flughäfen. Die Gesamtreisezeit („*Tür-zu-Tür*“) eines Passagiers hängt neben der reinen Flugzeit von der An-/Abreisezeit zum/vom Flughafen und von einem effizienten Übergang zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern ab. In diesem Zusammenhang hat das *Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE)*<sup>26</sup> im Rahmen des Programms *Flightpath*

<sup>24</sup> Detaillierte Erläuterungen der Elemente der Flughafen-Landseite bietet [35] S. 279.

<sup>25</sup> Der Modal Split beschreibt die Verteilung des Passagieraufkommens auf verschiedene Verkehrsmittel (Modi), wie Kraftfahrzeug, Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV), Fahrrad, etc.

<sup>26</sup> ACARE stellt strategische, technische und institutionelle Beratung für die *Europäische Kommission* und deren Mitgliedsstaaten zur Verfügung. <http://www.acare4europe.org/>, zuletzt geprüft am 15. November 2018.



**Abbildung 2-3: Funktionen und infrastrukturelle Betriebsanlagen der Flughafen-Landseite, in Anlehnung an [35] S. 276.**

2050 [32] das Ziel ausgegeben, dass 90 % aller Flugreisenden innerhalb Europas in 2050 binnen 4 Stunden Gesamtreisezeit ihr Ziel erreichen sollen. Die Forschungsprojekte *Personalized Airport Systems for Seamless Mobility and Experience (PASSME)* [50] und *Door to Door Information for Airports and Airlines (DORA)* [51] widmen sich speziell diesem Thema.

### 2.2.2 Terminalbereich

Die Terminals bilden die Schnittstelle zwischen Land- und Luftseite eines Flughafens. Unterschieden wird grundsätzlich zwischen Passagier- und Frachtterminals, wobei auf letztere hier nicht genauer eingegangen wird<sup>27</sup>. Bei Passagierterminals kann zwischen verschiedenen Konzepten unterschieden werden: dem Linearkonzept, dem Finger-/Pierkonzept, dem Satellitenkonzept und dem Transporterkonzept. Tabelle 2-2 listet die Vor- und Nachteile der verschiedenen Konzepte auf.

Das Linearkonzept gewährleistet für Passagiere, die mit dem Auto anreisen, kurze Wege, führt jedoch bei größeren Anlagen zu langen Wegen für Umsteiger. Somit eignet sich dieses Konzept eher für Flughäfen, die nur über ein geringes Verkehrsaufkommen verfügen und wenige Umsteiger aufweisen. *Hub*-Flughäfen mit einem hohen Aufkommen an Umsteigepassagieren setzen auf das Pier- oder Satellitenkonzept. Oft ist eine Mischung aus mehreren Konzepten bei *Hub*-Flughäfen vorhanden, um die Vorteile einzelner Konzepte zu nutzen. [47] S. 307 ff

<sup>27</sup> Obgleich Fracht eine nicht zu vernachlässigende und teilweise auch die wichtigste Erlösquelle für Flughäfen darstellt, z. B. für den Flughafen *Leipzig/Halle* (LEY) und den *Memphis International Airport* (MEM).



**Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile verschiedener Terminalkonzepte, in Anlehnung an [47] S. 307 ff.**

Konzept	Vorteile	Nachteile
<b>Linearkonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurze Wege von der Landseite zu den Flugsteigen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bei großen Terminals lange Wege für Umsteiger</li> <li>▪ Hoher Platzbedarf zum Manövrieren/geringe Anzahl an LFZ-Parkpositionen</li> </ul>
<b>Finger-/Pierkonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maximiert bei gering vorhandener Fläche die Anzahl der LFZ-Parkpositionen</li> <li>▪ Kurze Wege (innerhalb des Piers)</li> <li>▪ Bedürfnisgerechte Gestaltung von Zentralgebäude und Piers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gegenläufige Passagierströme</li> <li>▪ Überlastete Zentralbereiche in den Hauptverkehrszeiten</li> </ul>
<b>Satellitenkonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kompakte, meist runde Bauweise ermöglicht viele LFZ-Abstellpositionen</li> <li>▪ Kurze Wege (innerhalb des Satelliten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lange Distanzen zwischen Zentralgebäude und den Flugsteigen</li> <li>▪ Gegenläufige Passagierströme</li> <li>▪ Komplexe Gepäckförderung</li> </ul>
<b>Transporterkonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vermeidung langer Wegstrecken für Passagiere</li> <li>▪ Geringe Bauinvestitionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeits-, zeit- und kostenintensiv für Fluggesellschaften</li> </ul>

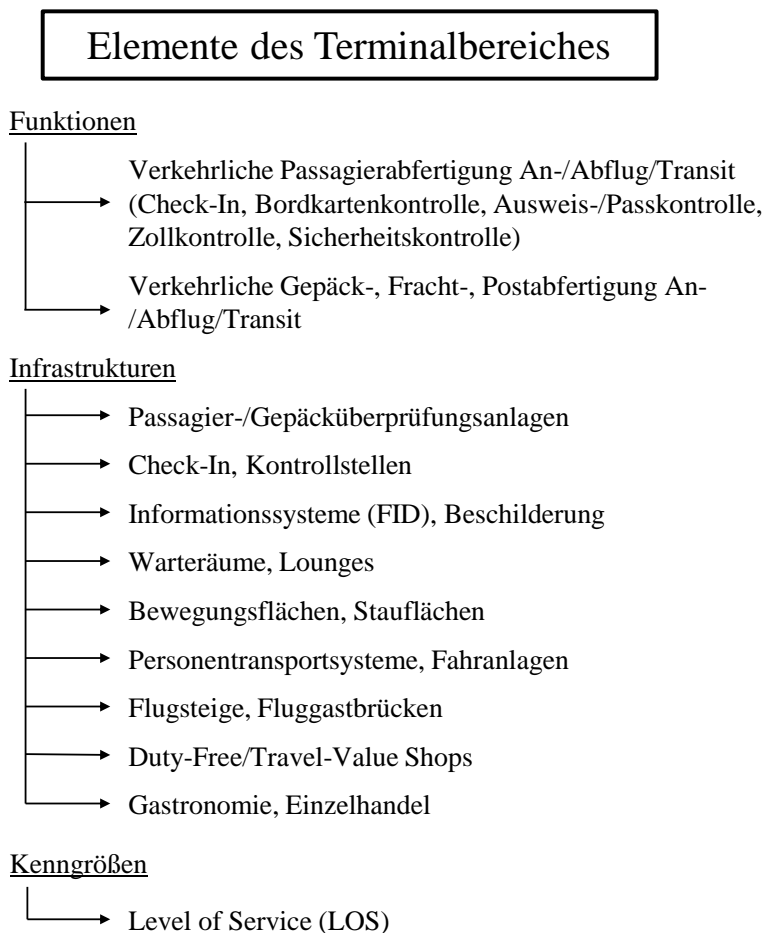
Bei Passagierterminals kann weiterhin zwischen Primär-, Sekundär- und Tertiärfunktionen unterschieden werden. Primärfunktion des Terminalbereiches ist die verkehrliche Abfertigung von an- und abfliegenden Passagieren (inkl. Transferpassagiere) sowie von Gepäck, Fracht und Post. Unterstützende bzw. ergänzende Maßnahmen hierzu sind z. B. der Verkauf von Flugtickets durch Reisebüros, Mietwagenservices oder die Bereitstellung von Gepäckwagen, welche unter Sekundärfunktionen zusammengefasst werden. Diese unterstützen die Primärfunktion, müssen aber nicht zwangsläufig vorhanden sein. Darüber hinaus kann von Tertiärfunktionen<sup>28</sup> gesprochen werden, die die Attraktivität von Flughäfen für Passagiere und Besucher maßgeblich steigern. Hierzu zählen Restaurants/Cafés, Bekleidungs- und Lebensmittelgeschäfte, Konferenz- und Veranstaltungsräume, Büros, etc. Dadurch avanciert der Flughafen zum Ausflugs- und Einkaufsziel. [35] S. 214

In den letzten Jahren gestalteten Flughäfen dedizierte LCC-Terminals, um den Ansprüchen der Kundengruppe der LCC zu genügen. Durch ein schlichtes Zweck-Design und weniger anspruchsvolle Ausstattung (keine Fluggastbrücken, keine komplexen Gepäcktransportsysteme, keine Lounges) kann ein reduziertes Passagierentgelt<sup>29</sup> und eine, von den LCC verlangte geringe LFZ-Abfertigungszeit (*Turnaround Time*, TAT) von 20 - 25 Minuten angeboten werden. [52] S. 100, [53] S. 25, [54]

Die wesentlichen Infrastrukturen, Funktionen und Kenngrößen des Terminalbereiches werden in Abbildung 2-4 zusammengefasst.

<sup>28</sup> Die Bedeutung von Tertiärfunktionen hat in den letzten Jahren zugenommen, da Flughäfen hier verstärkt zusätzliche Erlöse generieren können (siehe Kapitel 2.3.2).

<sup>29</sup> Lande- und Sicherheitsentgelte entsprechen in der Regel denen von FSNC.

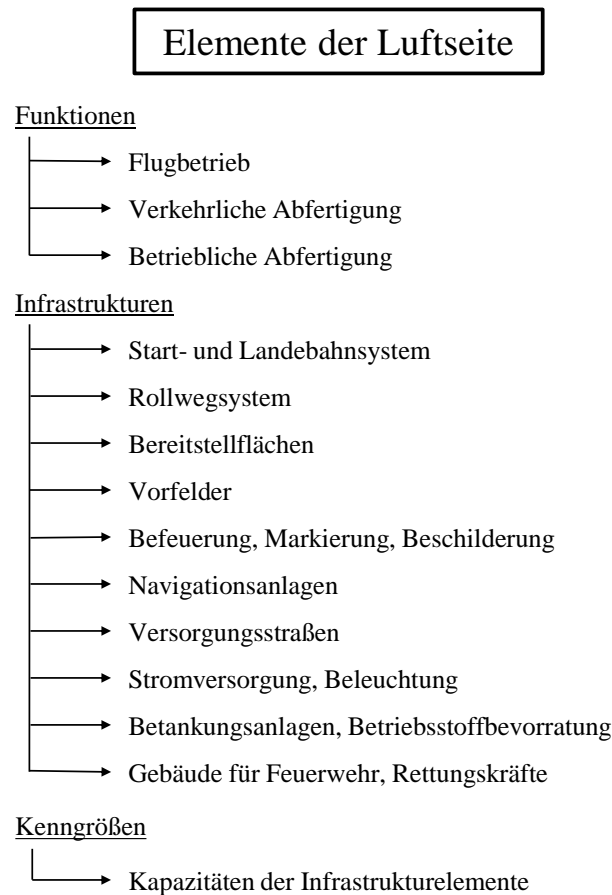


*Abbildung 2-4: Funktionen und infrastrukturelle Betriebsanlagen des Flughafen-Terminalbereiches, in Anlehnung an [35] S. 277.*

### 2.2.3 Flughafen-Luftseite

Die Flughafen-Luftseite stellt diejenigen Infrastrukturen zur Verfügung, die den Start, die Landung und das Abfertigen eines LFZ ermöglichen. Die Anzahl und Dimensionierung beeinflussen entscheidend den Flugbetrieb, wobei die Luftseite ca. 80 % - 95 % der Gesamtfläche des Flughafens beträgt [55] S. 295. Abbildung 2-5 fasst die wichtigsten Infrastrukturen und Funktionen zusammen.

Entscheidende Maße für Flughäfen sind die spezifischen Kapazitäten der Infrastrukturelemente und die Ausnutzung dieser Kapazitäten (Leistung), wie z. B. die SLB-Kapazität, die Vorfeldkapazität und die Gate-Kapazität. Analytische Modelle zur Berechnung der jeweiligen Kapazitäten sind in Kapitel 4.5.3 (für die SLB-Kapazität) und im Anhang A zu finden. Jedes Element weist seine individuelle Kapazität, angegeben in Flugbewegungen pro Zeiteinheit, auf. Dabei bestimmt die geringste Kapazität eines Subsystems die Gesamtkapazität des Flughafens.



*Abbildung 2-5: Funktionen und infrastrukturelle Betriebsanlagen der Flughafen-Luftseite, in Anlehnung an [35] S. 277.*

#### 2.2.4 Stand der Wissenschaft - Operationelle Leistungsfähigkeit von Flughafenelementen

*Stamatopoulos et al.* [56] entwickelten eine makroskopische Modellumgebung, die Flughafenbetreiber und -manager bei strategischen Entscheidungen zum Flughafenausbau bzw. bei der Optimierung von luftseitigen Verkehrsanlagen (SLB, Rollwege, Vorfelder) unterstützt. Das Modell prognostiziert die zukünftigen Kapazitäten der luftseitigen Verkehrsanlagen und bezieht die SLB-Konfiguration, die betrieblichen Eigenschaften (z. B. Verkehrsmix, Wettereinflüsse) und die lokalen Flugsicherungsgegebenheiten in die Modellierung ein. Verschiedene makroskopische Einzelmodelle kommen zur Analyse des SLB- und Vorfeldsystems zum Einsatz, die methodisch miteinander zusammengeführt werden, so dass die luftseitigen Verkehrsflüsse adäquat abgebildet werden können. Weiterhin ist das Abschätzen von Auswirkungen auf den Servicelevel für verschiedene Zukunftsszenarien möglich und erzielt den Autoren zufolge, gute Ergebnisse. Der Fokus liegt auf einer schnellen, zuverlässigen Simulation mit geringem Aufwand.

*Baltazar et al.* [57] verfolgten die Entwicklung von Modellen zur Prognose der Produktivität und Effizienz von Flughäfen, mittels robuster und flexibler Methoden. Aufgrund des wachsenden Wettbewerbs sind diese beiden Faktoren wichtig für Flughafenbetreiber. Die Bewertung erfolgt für drei Flughäfen (*Lissabon* (LIS), *Ponta Delgada* (PDL) und *Barcelona* (BCN)) über mehrere Jahre (2006 - 2011) auf Basis zweier Techniken: einer multikriteriellen

Entscheidungsanalyse und einer Datenhüllenanalyse<sup>30</sup>. Erstere erzielt den Autoren nach vielversprechende Ergebnisse, wobei die Suche nach den signifikantesten Indikatoren, um aufkommende Entwicklungen bewerten zu können, weiter fortgesetzt werden muss.

Für die Bewertung von Prozessen innerhalb von Passagierterminals entwickelten *Brunetta et al.* [59] ein Modell namens *Simple Landside Aggregate Model* (SLAM). Jedes Prozess- bzw. Wartelement wird modularisiert abgebildet und sowohl die Kapazität als auch der LOS, welcher als zur Verfügung stehender Platz und Wartezeit bis zum Prozessstart definiert wird, können ermittelt werden.

*Farhadi et al.* [60] untersuchten einen dreischichtigen Ansatz zur Bewertung des SLB-Kapazitätsmanagements basierend auf der SLB-Konfiguration, des Flugplans und des Staffellungsstandards am Beispiel des Flughafens *Doha* (DOH). Mittels einer Optimierungsheuristik wird die An- und Abflugfrequenz unter Beibehalten des Grundsatzes *First-Come-First-Serve* angepasst. Wesentliche Einsparungen im Treibstoffverbrauch und die Reduzierung von Verspätungen sind zu erwarten. Weiterhin bekräftigen die Ergebnisse, dass Entscheidungen über die Zuweisung von Flugzeugen auf eine SLB eine entscheidende Rolle zur Kostenreduzierung und zum Aufzeigen einer optimalen Flugplanstruktur spielen.

Weiterhin beschäftigte sich *Mühlhausen* [61] mit der Frage, ob die Nutzung eines in der Nähe zu einem Großflughafen angesiedelten Regionalflughafens als Satellitenflughafen („zusätzliche Runway“) zu einer deutlichen Steigerung der Kapazität führt. Insbesondere die landseitige Verbindung muss mit minimalen Verzögerungen für den Passagier einhergehen, da die Reisezeit ein entscheidender Faktor bei dieser Betrachtung ist. *Mühlhausen* modellierte das Flughafensystem, respektive die Passagiervläufe an und zwischen den Flughäfen, mittels einer makroskopischen Simulation auf Basis von *System Dynamics*.

Ein Projekt, dass sich bereits mit der generischen Modellierung von Flughäfen beschäftigt hat, ist das von der *Europäischen Union* (EU) geförderte *Aeronautical Study on Seamless Transport* Projekt, kurz ASSET [62]. Ziel war ein integrierter Ansatz zur Optimierung der Abläufe landseitiger Flughafenprozessoren<sup>31</sup>, um die Pünktlichkeit und die Prognosefähigkeit zu verbessern sowie die TAT der LFZ besser planen zu können. Die Analyse stützt sich auf generische Simulationsmodelle<sup>32</sup> für einen mittelgroßen und einen *Hub*-Flughafen. Hierfür wurden die Charakteristika von 56 europäischen Flughäfen untersucht und auf Basis des Medians sowie der Anzahl zur Verfügung stehender Charakteristika zwei Flughäfen bestimmt, die die beiden Flughafentypen in ASSET repräsentieren. Der Fokus liegt jedoch nur auf landseitigen Charakteristika, unter anderem der Terminalanzahl, dem Terminalkonzept und der Anzahl an Check-in Schaltern/Sicherheitskontrollen/Passkontrollen/Gepäckbänder [55, S. 26]. Weiterhin werden im Vorhinein die Flughäfen auf Basis einer festgelegten Definition den beiden Flughafentypen zugeordnet. Ein mittelgroßer Flughafen besitzt ein Passagieraufkommen zwischen 5 Mio. und 25 Mio. Passagieren pro Jahr und der Anteil an Umsteigern beträgt

<sup>30</sup> Die Datenhüllenanalyse (*Data Envelopment Analysis*, DEA), eine Teildisziplin des *Operations Research*, ist eine Technik, die sich dem strukturierten und relativen Effizienzvergleich mehrerer Entscheidungseinheiten (*Decision Making Units*, DMU) widmet. Jedes Objekt, dass durch *Inputs* (Material, Kosten) und *Outputs* (Umsatz, Qualität) charakterisiert werden kann, kann eine Entscheidungseinheit darstellen. Die Modellgestaltung ist jedoch ein entscheidender Faktor zur Gewinnung valider und aussagekräftiger Effizienzergebnisse [58] S. 1 ff.

<sup>31</sup> Unter anderem die durchschnittliche Prozesszeit für Inlandsflüge, internationale Flüge und Umsteigeflüge, die TAT sowie die Reduzierung von verlorenem Gepäck.

<sup>32</sup> Die Simulationen wurden mit dem mikroskopischen Modell *Traffic Oriented Microscopic Simulator* (TOMICS) des *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.* durchgeführt.

weniger als 30 % [63] S. 6. *Hub*-Flughäfen fertigen über 25 Mio. Passagiere pro Jahr ab und der Anteil an Umsteigern liegt über 30 %. Ergebnis der Analysen in ASSET ist, dass der Flughafen *Hamburg* ein typischer, mittelgroßer Flughafen Europas und der Flughafen *Paris-Charles de Gaulles* ein typischer *Hub*-Flughafen Europas ist [64].

Um Prozessveränderungen bewerten zu können, wird zunächst ein Referenzszenario definiert. Jeder *Point of Activity* (POA) des Passagiers (Check-in, Sicherheitskontrolle, etc.) wird detailliert modelliert und eine durchschnittliche Gehzeit zwischen den POA angenommen. Passagiere werden in ASSET in zwei Kategorien eingeteilt: Geschäftsreisender und Tourist. Diesen Passagierkategorien können dann verschiedene Eigenschaften, unter anderem Reiseerfahrung, Gehgeschwindigkeit, Anzahl der Gepäckstücke und Gruppenzugehörigkeit zugewiesen werden [63] S. 7. Passagiere mit ähnlichen Zielflughäfen zeigen dabei ähnliche Charakteristika. Eine integrierte Lösung, die das Potential zur Verbesserung der landseitigen Flughafenprozesse aufweist, ist laut den Autoren die Abschaffung des *Check-in* und die Nutzung der *Identity Card* (Personalausweis) als *Boardingpass* (Bordkarte).

Des Weiteren existieren eine Reihe kommerzieller, mikroskopischer Softwaremodelle, die detaillierte Designs von mehreren Flughafenelementen gleichzeitig ermöglichen.

*AirTop* [65] ist eine Software für Schnellzeitsimulationen. Einerseits sind Simulationen des Luftraums, z. B. von Luftraumkapazitäten, von An- und Abflugverfahren für Flughäfen und von Verkehrsflüssen, möglich. Andererseits können Passagierflüsse innerhalb von Terminals und Flugzeug- sowie Fahrzeugbewegungen auf dem Vorfeld simuliert werden.

Die Firma *ATAC Aviation Analysis Experts* vertreibt ein Softwaremodell namens *SIMMOD*, das eine detaillierte und regelbasierte Nachbildung der luftseitigen Verkehrsabläufe des Flughafens sowie des flughafennahen Luftraums ermöglicht. Veränderungen in Bezug auf den Rollverkehr, die luftseitige Infrastruktur, die Positionierungsbereiche und die Nutzungsstrategie der SLB können in kurzer Zeit sowie mit unterschiedlichen Annahmen simuliert werden. [66]

Ein weiteres Softwarewerkzeug zur Modellierung von Lufträumen und Flughäfen ist der *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM) von *Jeppesen*. *TAAM* kann von Flugsicherungsorganisationen, Flughafenbetreibern und Fluggesellschaften genutzt werden. In Bezug auf Flughäfen sind unter anderem die Bewertung neuer Infrastrukturinvestitionen, Auswirkungen von Störungen auf den Betrieb und den Flugplan sowie Auswirkungen auf die Erlöse möglich. Weiterhin können *Gate-zu-Gate* Simulationen durchgeführt werden. [67]

Zur Simulation von Passagierbewegungen innerhalb der Terminals werden vorzugsweise mikroskopische Modelle eingesetzt. Der *Traffic Oriented Microscopic Simulator* (TOMICS) des Instituts für Flughafenwesen und Luftverkehr am *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) ist ein Beispiel hierfür. Das Modell fokussiert sich auf die Abbildung einer möglichst hohen Bandbreite an Verkehrsprozessen im Terminalbereich. Die individuellen Bewegungen der Objekte (Passagiere) in einem definierten Raum (Richtung und Geschwindigkeit) werden auf Basis bereits bestehender Modelle ermittelt und simuliert. TOMICS erlaubt dabei die Einbindung von verschiedenen Charakteristika wie Gehgeschwindigkeit, Gruppenzugehörigkeit oder Prozessstatus. Weiterhin werden eventuelle Konflikte ständig geprüft. [68]

Die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten und Modelle sowie deren Fokus sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst.

**Tabelle 2-3: Zusammenfassung der Quellen zur Modellierung/Bewertung der operationellen Leistungsfähigkeit von Flughäfen.**

	SLB	Vorfeld	Terminal	FH-Leistung	An- und Abflüge	Luftraum
<i>Stamatopoulus et al. [56]</i>	✓	✓	✗	✗	✓	✗
<i>Baltazar et al. [57]</i>	✗	✗	✗	✓	✗	✗
<i>Brunetta et al. [59]</i>	✗	✗	✓	✗	✗	✗
<i>Farhadi et al. [60]</i>	✓	✗	✗	✗	✓	✗
ASSET [62]	✗	✓	✓	✗	✗	✗
<i>Mikroskopische Softwaremodelle</i>						
AirTop [65]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SIMMOD [69]	✓	✓	✗	✗	✓	✗
TAAM [67]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TOMICS [68]	✗	✓	✓	✗	✗	✗

## 2.3 Der Flughafen als kommerzielles Unternehmen

Flughäfen haben sich in den letzten Jahrzehnten gewandelt, ausgehend vom reinen Infrastrukturanbieter und Verkehrsknotenpunkt des LTS zu einem komplexen, kommerziell agierenden Dienstleistungsunternehmen [49] S. 1, [11] S. 1. Auswirkungen zeigte dieser Trend vor allem auf die Erlösstruktur. Sowohl sinkende Verkehrserlöse als auch zurückgehende Erlöse bei den Bodenverkehrsdiensten durch Liberalisierung und Deregulierung zogen eine zunehmende Fokussierung auf den *Non-Aviation* Bereich nach sich, welcher heutzutage durchaus existenzsichernd ist [49] S. 31. Da in dieser Arbeit ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt wird und nicht nur infrastrukturelle bzw. betriebliche Merkmale von Flughäfen betrachtet werden, greift das folgende Kapitel die ökonomischen Merkmale auf und geht dabei auf Geschäftsmodelle und -strategien von Flughäfen (Kapitel 2.3.1) sowie deren Erlös- und Kostenstruktur (Kapitel 2.3.2) ein. Abschließend wird der Stand der Wissenschaft in Bezug auf Geschäftsmodelle und die betriebswirtschaftliche Ausrichtung von Flughäfen analysiert (Kapitel 2.2.4).

### 2.3.1 Geschäftsmodelle und -strategien

Flughäfen richten ihr Geschäftsmodell am Markt aus. Davon abhängig sind die Erlösstruktur, der Wettbewerb mit anderen Flughäfen sowie die Abhängigkeit gegenüber Fluggesellschaften. *Schulz et al. [49]* teilen Flughäfen gemäß ihrer Geschäftsstrategien in fünf Gruppen ein: Große

*Hub*-Flughäfen, Hybridmodelle, Spezialisierung auf Billigfluggesellschaften, Frachtflughäfen und Flughafensysteme.

*Hub*- oder auch Drehkreuz-Flughäfen sind oft die Heimatbasis großer Fluggesellschaften, welche ein ausgeprägtes Streckennetz zu einer Vielzahl an Destinationen mit hoher Frequenz anbieten. Dadurch dienen *Hub*-Flughäfen als Umsteigeflughäfen<sup>33</sup> und fertigen große Passagierolumina pro Jahr ab. Weiterhin haben sie sich hauptsächlich auf Linienfluggesellschaften und einen hochwertigen Service für *First*- und *Business-Class* Passagiere spezialisiert. [49] S. 41 ff

Im Gegensatz dazu zeigen Hybrid-Flughäfen keine eindeutige Spezialisierung. Im Allgemeinen herrscht ein homogener Verkehrsmix aus Linien- und Charterfluggesellschaften sowie LCC vor. Die Befriedigung der unterschiedlichen Kundenbedürfnisse und -anforderungen stellt in der Praxis jedoch eine Herausforderung dar (vgl. Kapitel 2.4). Weiterhin typisch für Hybrid-Flughäfen ist ein großes Einzugsgebiet und somit ein hohes Angebot an Direktverbindungen sowie wenige Transferpassagiere. [49] S. 41 ff

*Low-Cost* Flughäfen, also Flughäfen die sich auf die Abfertigung von LCC (Anteil größer als 50 %) spezialisiert haben, sind oft kleine Regionalflughäfen oder frühere Militärflughäfen, die sich in erreichbarer Nähe zu größeren Wirtschaftszentren befinden. Diese bieten den Fluggesellschaften niedrige, vom Passagieraufkommen abhängige Flughafenentgelte, eine bedarfsorientierte Ausstattung, kurze Wege sowie geringe Standzeiten. Nachteilig ist die Abhängigkeit von einem oder wenigen LCC. Diese sind streng kostenfixiert und positionieren sich dort, wo die Nachfrage vorhanden ist. Wandern die LCC ab, verlieren die Flughäfen den größten Kunden. Durch ein zweites wirtschaftliches Standbein (z. B. Fracht) wird versucht, diese Abhängigkeit zu reduzieren. [49] S. 41 ff

Weiterhin existieren Flughäfen, die sich auf die Abfertigung von Fracht spezialisiert haben. Da 35 % - 40 % des weltweiten Warenwertes auf dem Luftweg transportiert wird, bei globalen Wachstumsraten von vier bis fünf Prozent jährlich [71], ist dies ein lukratives Geschäftsmodell. Frachtflughäfen unterliegen in der Regel keinem Nachtflugverbot und weisen eine gute Anbindung an das Schienen- und Straßenverkehrsnetz auf. [49] S. 41 ff

Diese Einteilung komplettieren die Flughafensysteme, ein Zusammenschluss von zwei oder mehreren Flughäfen, die als Einheit dasselbe Ballungsgebiet bedienen. Voraussetzung ist, dass diese über eine gewisse infrastrukturelle Anbindung untereinander verfügen<sup>34</sup>. Ein Beispiel ist das Londoner Flughafensystem, bestehend aus den Flughäfen *London Heathrow* (LHR), -*Stansted* (STN), -*Gatwick* (LGW), -*Luton* (LTN) und -*City* (LCY). [49] S. 41 ff

### 2.3.2 Erlös- und Kostenstruktur

Flughafenerlöse können in zwei Kategorien unterteilt werden. Einerseits die Verkehrserlöse (*Aviation Revenues*), welche sich direkt auf den Abfertigungsprozess von LFZ, Passagieren und Fracht beziehen. Andererseits die kommerziellen Erlöse, die so genannten *Non-Aviation Revenues* (nicht-verkehrsbezogene Erlöse) [49] S. 32. Die Abgrenzung zwischen den genannten Kategorien ist dabei nicht immer eindeutig und wird unterschiedlich gehandhabt, da keine

---

<sup>33</sup> Qualitätsmerkmale für Umsteigeflughäfen sind eine geringe minimale Umsteigezeit (*Minimum Connecting Time*, MCT) und kurze Wege für Umsteiger [70].

<sup>34</sup> EWG (1992) Amtsblatt der *Europäischen Gemeinschaften* Nr. L 240/8, Verordnung Nr. 2408/92 des Rates vom 23. Juli 1992, Brüssel, Belgien.

einheitliche Definition der Kategorien existiert. LFZ-Abfertigungsentgelte können z. B. beiden Kategorien zugeordnet werden, je nachdem ob der Flughafen diese Dienstleistung selbst anbietet und durchführt oder Abfertigungsdienstleister durch die Fluggesellschaft beauftragt werden und somit die Konzessionen den kommerziellen Erlösen zugeordnet werden. Dadurch wird die Vergleichbarkeit von kommerziellen Erlösen zwischen Flughäfen erheblich erschwert.

### 2.3.2.1 Verkehrserlöse

Die Kunden des Flughafens, in erster Linie die Fluggesellschaften, entrichten Entgelte an den Flughafen für die Bereitstellung der Infrastruktur und für die Abwicklung des Flugbetriebs. Diese Verkehrserlöse werden untergliedert in:

- Landeentgelte (*Maximum Take-off Mass* (MTOM)- und Passagier-/Fracht-abhängig)
- Passagier-/Terminalentgelte
- LFZ-Abstellentgelte (Vorfeld, Hangar)
- Lärm-/Emissionsentgelte
- Abfertigungsentgelte (wenn vom Flughafen angeboten)
- Sonstige Verkehrserlöse (z. B. Fluggastbrücken, Beleuchtung, Schlepper, etc.)
- (Luft-) Sicherheitsgebühren

Alle Entgelte müssen in direktem Zusammenhang mit den tatsächlich anfallenden Investitions- und Betriebskosten des Flughafens stehen. Weiterhin werden Luftsicherheitsgebühren für Personen- und Gepäckkontrollen erhoben. Diese stellen Abgaben an Behörden dar, auf dessen Höhe der Flughafen einen begrenzten Einfluss hat<sup>35</sup>. Tabelle 2-4 zeigt die Entwicklung der Verkehrserlöse von 1983 bis 2012. Zu erkennen ist ein rückläufiger Trend der Verkehrserlöse bis 1999 und eine Stabilisierung in der 2000er Jahren. Diese Tendenz ist nicht nur auf den Druck der Fluggesellschaften und Behörden zurückzuführen, die versuchen den Anstieg der Flughafenentgelte so gering wie möglich zu halten, sondern ebenso der gezielten Erweiterung der Geschäftstätigkeit der Flughäfen im kommerziellen Bereich (siehe nachfolgendes Kapitel).

**Tabelle 2-4: Erlösverteilung an europäischen Flughäfen, in Anlehnung an [52] S. 72, Datenquelle für 2012: [72].**

	1983/84	1988/89	1993/94	1998/99	2003/04	2006/07	2012
<b>Verkehrserlöse [%]</b>	59	56	54	50	51	52	52
<b>Kommerzielle Erlöse [%]</b>	41	44	46	50	49	48	48

<sup>35</sup> Durch LOS-Vereinbarungen zwischen Flughafen und Behörde ergeben sich Auswirkungen auf die Anzahl der Kontrollstellen am Flughafen.



### 2.3.2.2 Kommerzielle Erlöse

Kommerzielle Erlöse haben nur einen indirekten Bezug zu den Verkehrserlösen. Aber je mehr Fluggesellschaften einen Flughafen anfliegen, desto mehr Passagiere nutzen ihn, so dass durch diese potentiell mehr Erlöse (z. B. im Bereich des Parkraummanagements) oder durch direkte Einkäufe erzeugt werden.

In folgenden Bereichen lassen sich kommerzielle Erlöse generieren:

#### Direkt/indirekt abhängig vom Passagieraufkommen

- Parkraummanagement
- Mieten
- Konzessionen (Restaurants, Cafés, Shops)
- direkte Verkaufsaktivitäten und Services
- Catering

#### Unabhängig vom Passagieraufkommen

- Immobilienmanagement
- Beteiligungen und Beratung
- Werbeflächen
- Flughafenrundfahrten (*Airport Tours*)

Gegenüber den Verkehrserlösen haben die kommerziellen Erlöse seit 1983 deutlich an Bedeutung gewonnen (siehe Tabelle 2-4). Manche Flughäfen steigerten den Anteil bis 1998 um mehr als 10 %, wie z. B. der Flughafen *Kopenhagen-Kastrup* (CPH, von 41 % auf 54 %) oder der Flughafen *Genf Cointrin* (GVA, von 40 % auf 51 %) [52] S. 73. Dabei ist die Verteilung innerhalb der einzelnen Bereiche global gesehen unterschiedlich (siehe Abbildung 2-6).

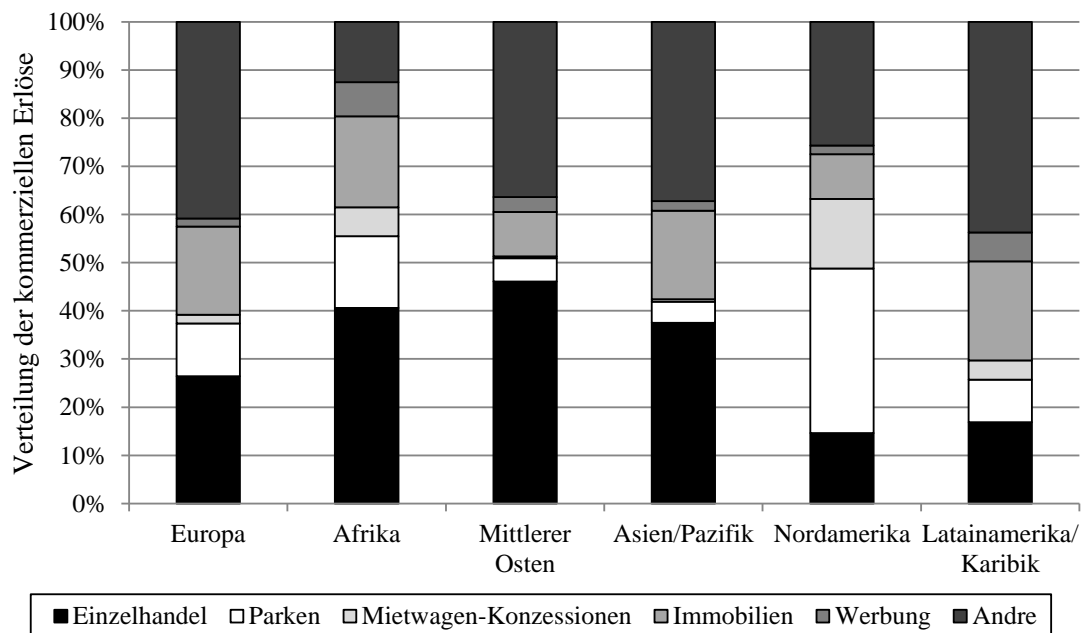


Abbildung 2-6: Verteilung der kommerziellen Erlöse an ACI<sup>36</sup> Flughäfen nach Kontinenten, 2006, [73] S. 6, [52] S. 195.

<sup>36</sup> Airport Council International.

In Afrika, dem Mittleren Osten und in Asien/Pazifik dominieren Erlöse aus dem *Retail*, also dem Einzelhandel, direkten Verkaufsaktivitäten und Services. Auch in Europa ist der *Retail*-Anteil mit knapp über 25 % deutlich ausgeprägt, doch den größten Anteil bilden die sonstigen Erlöse mit ca. 40 %. Hierunter fallen in Europa vor allem die Erlöse aus den Bodenverkehrsdiensten und Beteiligungen/Beratung. In Nordamerika enthält diese Kategorie auch Gebühren für Passagieranlagen und Flughafenausbaugebühren.

Weiterhin ist die Dominanz des motorisierten Individualverkehrs (MIV)<sup>37</sup> in Nordamerika deutlich zu erkennen. Viele Amerikaner besitzen ein Auto und nutzen dieses, um zum Flughafen zu kommen, auch weil amerikanische Flughäfen in den seltensten Fällen über eine Zug- oder Busanbindung verfügen. Etwa 50 % der kommerziellen Erlöse werden dadurch beim Parkraummanagement (*Car Parking*) und durch Konzessionen bei der Autovermietung (*Rental Car Concession*) erzielt. [73] S. 6

### 2.3.2.3 Kosten

Den Erlösen stehen Kosten gegenüber, die es zur Aufrechterhaltung der Geschäftstätigkeit abzudecken gilt. Hierbei gibt es keinen Industriestandard für das Berichtswesen von Flughafenkosten, da die Kostenstruktur unter anderem von der Rechtsform und dem Standort eines Flughafens abhängig ist. Laut Graham [52] sind zumindest drei Kategorien in der Regel gegeben: Personalkosten, Abschreibungen und andere Kosten. Aufgrund der fehlenden Standards ist eine klare Definition und Unterscheidung der jeweiligen Kostenarten schwierig.

Die Kostenanteile liegen in Europa bei rund 33 % für das Personal und weitere 20 % für Abschreibungen<sup>38</sup>. Dabei sind die durchschnittlichen Personalkosten seit 1983 stark gesunken, was vor allem an der Auslagerung von Dienstleistungen der Bodenabfertigung an externe Unternehmen, aber auch einer erhöhten Produktivität der Arbeiterschaft liegt. Diese Abnahme gilt dennoch nicht im Allgemeinen. An Flughäfen, die die Bodenabfertigung selbst durchführen (z. B. am Flughafen *Frankfurt/Main* oder *Wien-Schwechat*), liegen die Personalkosten bei über 50 % [52] S. 73.

### 2.3.2.4 Einflussfaktoren auf Kosten und Erlöse

Ein wichtiger Einflussfaktor auf Erlöse und Kosten von Flughäfen ist das Passagier- bzw. Frachtaufkommen. Je mehr Passagiere bzw. Fracht ein Flughafen abfertigt, desto niedriger fallen die Stückkosten pro Passagier bzw. Tonne aus (Skaleneffekt - *Economies of Scale*). Eine Studie der ICAO (1999) fand heraus, dass die Kosten für eine *Work Load Unit*<sup>39</sup> (WLU), respektive die Stückkosten, bei Flughäfen mit unter 300 000 WLU pro Jahr bei 15 US\$ liegen. Bei Flughäfen zwischen 300 000 und 2,5 Mio. WLU betragen die Stückkosten nur noch 9,4 US\$ und zwischen 2,5 Mio. und 25 Mio. WLU sind es 8 US\$. [52] S. 76, [75]

Fixkosten für die Bereitstellung der Infrastruktur und bestimmte Dienstleistungen (unter anderem die Rettungsdienste) fallen unabhängig von der Flughafengröße und des Verkehrsaufkommens an, so dass sich die Stückkosten bei kleineren Flughäfen erhöhen. Vermutet wird aber auch, dass Flughäfen auch Größennachteilen (negative Skaleneffekte - *Diseconomies of*

---

<sup>37</sup> MIV ist eine spezielle Form des Individualverkehrs und ist die Bezeichnung für alle Verkehrsprozesse, die durch den Nutzer in der Regel mit einem Kraftfahrzeug (PKW oder Motorrad) selbst geplant und durchgeführt werden [74].

<sup>38</sup> In 2006.

<sup>39</sup> Eine WLU (Arbeitseinheit) entspricht der Abfertigung eines Passagiers oder 100 kg Fracht.

*Scale*) ausgesetzt sind und es somit eine optimale ökonomische Flughafengröße geben kann [76]. Beispiele für diese Nachteile sind unter anderem eine steigende Komplexität aufgrund mehrerer Terminals, die Vervielfachung von Dienstleistungseinrichtungen, die Herausbildung starker Gewerkschaften, die die Personalkosten ansteigen lassen, und die Verknappung günstiger Landflächen in der Flughafenumgebung [77]. Jedoch können größere Flughäfen, das heißt mit mehr als 25 Mio. Passagieren pro Jahr, durch eine Vielfalt an Geschäften höhere kommerzielle Erlöse erzielen. Die Studie der ICAO zeigt, dass diese 58 % ihrer Gesamterlöse durch nicht-verkehrsbezogene Erlöse verdienen, verglichen mit durchschnittlich 36 % über die gesamte Stichprobe [52] S. 77, [75].

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Passagiertyp. Passagiere, die international verreisen, geben mehr Geld in Geschäften, Bars, Cafés und *Duty- & Tax-Free Shops* aus [78], [79]. Aber sie kosten den Flughafen auch mehr, da sie durch längere Aufenthaltszeiten und eine größere Anzahl an Gepäckstücken mehr Terminalfläche beanspruchen. Weiterhin müssen Einrichtungen für Zoll- und Ausweiskontrollstellen sowie *Lounges* vorgehalten werden. Im Vergleich dazu sind *Low-Cost* und Charterpassagiere anspruchsloser. Der vorherrschende Passagiertyp an einem Flughafen ist auch entscheidend für die Wahl des LOS und für die Erwartungen, die der Flughafen erfüllen möchte<sup>40</sup>.

Auch die Unternehmensform von Flughäfen hat Einfluss auf die Erlös- und Kostenstruktur. Jeder Staat hält zur Einrichtung und zum Betrieb von Flughäfen eigene Rechtsgrundlagen vor und daraus folgend auch Regelungen zur Unternehmensform. Weltweit befinden sich noch über 90 % der Flughäfen in Staatseigentum oder in öffentlicher Hand. Nur ein kleiner Teil ist im Besitz von privatwirtschaftlichen Unternehmen [49] S. 34. Das führt unter Anderem zu Unterschieden im Rechnungswesen und der Bilanz, z. B. in Bezug auf das Anlagevermögen und über welche Perioden Abschreibungen erfolgen.

Ebenso entscheidend ist der Standort, der durch den Flughafenbetreiber aber nicht beeinflussbar ist. Hierdurch können z. B. witterungsabhängige Kosten aufgrund von überdurchschnittlich häufiger Schneeräumungen entstehen oder die zur Verfügung stehenden Ressourcen aufgrund eines Nachtflugverbots (Lärm- und Emissionsschutz) nicht in vollem Umfang ausgenutzt werden, obwohl eine ausreichende Nachfrage besteht. Des Weiteren hat der Standort einen Einfluss auf das Lohnniveau (vgl. Kapitel 4.4.3) und die Kosten für Infrastrukturmaßnahmen. [52] S. 76

### **2.3.3 Stand der Wissenschaft - Geschäftsmodelle und betriebswirtschaftliche Ausrichtung**

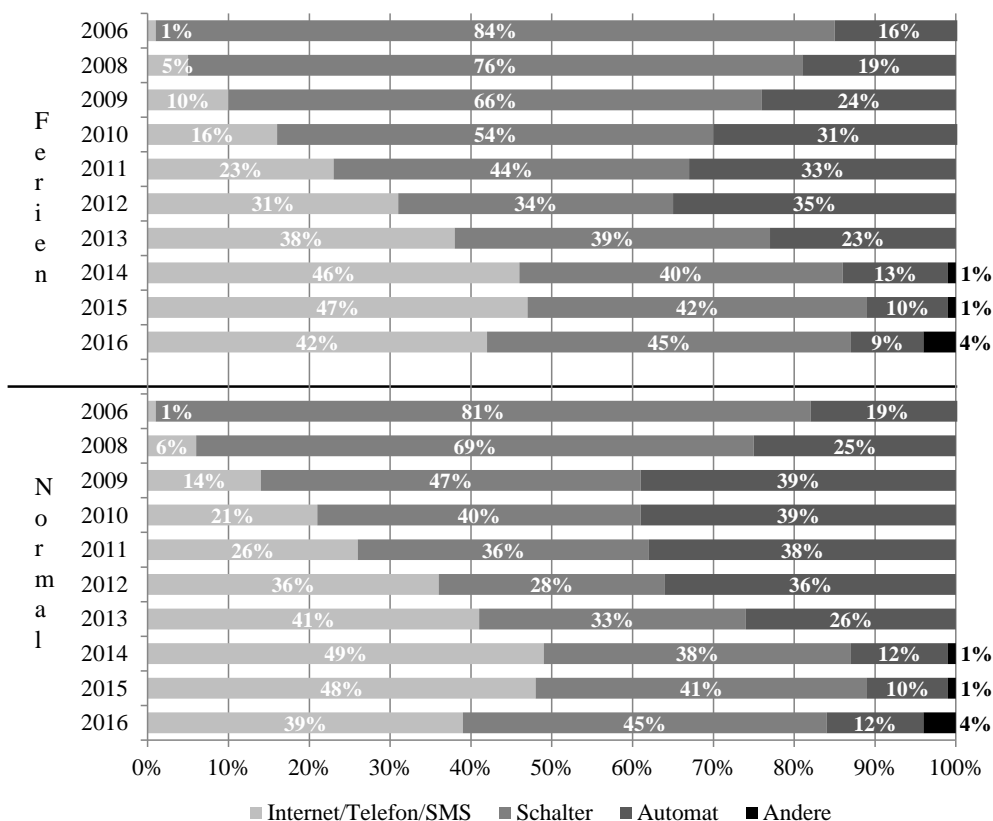
*Graham* [80] untersuchte die Wichtigkeit von kommerziellen Erlöse für heutige Flughäfen, wobei rund die Hälfte der Gesamterlöse auf diesen Geschäftszweig entfallen. Jedoch schwanken die Anteile von Flughafen zu Flughafen. Dies liegt einerseits an der Inkonsistenz, wie kommerzielle Erlöse von den Flughäfen angegeben werden. Andererseits hat die geografische Lage des Flughafens eine entscheidende Bedeutung. In 2006 generierten europäische Flughäfen 12 US\$, Flughäfen in der Region Asien/Pazifik bzw. Afrika/Mittleren Osten 7 US\$ bis 8 US\$ und nordamerikanische Flughäfen nur 6 US\$ kommerzielle Erlöse im Durchschnitt pro

---

<sup>40</sup> Dies reicht von einem Swimmingpool im Terminal (*Singapur Changi Airport*, SIN) bis hin zum anderen Extrem, einem dedizierten *Low-Cost* Terminal (*Kuala Lumpur International Airport*, KUL und Flughafen *Marseille*, MRS).

Passagier. Die Bedeutung der kommerziellen Erlöse hat in den letzten zwei Jahrzehnten jedoch zugenommen (vgl. Tabelle 2-4). Ein Grund dafür ist, dass die Erlöse der Fluggesellschaften aufgrund der gestiegenen Konkurrenz immer geringer ausfielen. Somit erhöhte sich der Druck seitens der Fluggesellschaften die Höhe der Verkehrsgebühren, als zweite Erlösquelle der Flughäfen, genau zu überwachen. Ein wichtiger Faktor, der das Konsumverhalten der Passagiere beeinflusst, ist die (Über-) Füllung des Terminals. Infolgedessen erhöht sich der Stresslevel der Passagiere<sup>41</sup>, einer der Haupteinflussfaktoren auf das Konsumverhalten, da gestresste Passagiere weniger Umsatz generieren [81], [82].

Einen weiteren Einfluss auf die kommerziellen Erlöse stellen veränderte Abläufe dar. Passagiere checken immer häufiger online oder am Automaten für ihren Flug ein (siehe Abbildung 2-7). Inwieweit dies einen positiven (die Passagiere sparen Zeit dabei, aber die Verweildauer am Flughafen bleibt gleich) oder neutralen Effekt (Passagiere verbringen weniger Zeit am Flughafen) hat, ist zu untersuchen. Auch Sicherheitsvorschriften wie das Flüssigkeitsverbot<sup>42</sup> verändern die Kaufgewohnheiten der Passagiere. In den Medien wird diskutiert, dass die Preise für alltägliche Güter, wie beispielsweise eine Flasche Wasser, hinter der Sicherheitskontrolle deutlich überteuert sind [86]. In Bezug auf dieses Thema hat die EU-Verkehrskommissarin *Violeta Bulc* das Ziel (2015), dass an allen europäischen Flughäfen ein halber Liter Wasser für einen Euro käuflich zu erwerben ist.



**Abbildung 2-7: Entwicklung des Check-in Verhaltens am Hamburger Flughafen, Datenquelle: regelmäßige Fluggastbefragung am Flughafen Hamburg, Statistische Analyse von Löwa [83].**

<sup>41</sup> Dieser Faktor wurde auch in PASSME des EU-Förderprogramms *Horizon 2020* untersucht [50].

<sup>42</sup> Siehe hierzu Durchführungsverordnung (EU) 2015/1998 der EU-Kommission vom 5. November 2015 zur Festlegung detaillierter Maßnahmen für die Durchführung der gemeinsamen Grundstandards für die Luftsicherheit [84]. Einen guten Überblick gibt der ADV in *Luftsicherheit im Blick* [85].

Viele Flughäfen, wie z. B. die Flughäfen *Köln/Bonn* (CGN), *Frankfurt/Main* (FRA), und *Dortmund* (DTM), sind diesem Aufruf gefolgt. Jedoch wollen viele Flughäfen „das lukrative Geschäft“ nicht aufgeben [87].

*Fasone et al.* [88] untersuchten die Determinanten der kommerziellen Erlöse, insbesondere die abhängigen Variablen *Non-Aviation Revenue per Passenger*, als Maß für die Leistung eines Flughafens, und *Non-Aviation Revenue per Square Meter*, als Maß für das Angebot des Flughafens. Hierfür wird ein Datensatz von 15 deutschen, international operierenden Flughäfen für die Jahre 2009 - 2012 betrachtet und mit zwei verschiedenen Regressionsanalysen (*Ridge Regression*, RR und *Partial Least Squares*, PLSR) untersucht. Hauptvorteil dieser Methoden ist die Vorbeugung von Parameterinstabilität, verursacht durch Autokorrelation. *Fasone et al.* zeigen, dass die Größe des Flughafens auf beide Variablen einen negativen Einfluss hat. Wie auch bereits Graham führen sie dies auf eine Abnahme des Konsums bei steigendem Passagiervolumen und somit zunehmender Überfüllung zurück. Ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Ausgaben der Passagiere am Flughafen, hat die Präsenz von LCC [88].

Einen positiven Einfluss (signifikant für *Non-Aviation Revenue per passenger*) besitzt dagegen, die zur Verfügung stehende Fläche für kommerzielle Aktivitäten. Zusammenfassend stellen *Fasone et al.* fest, dass verkehrs- und nicht-verkehrsbezogene Aktivitäten zwei konkurrierende Seiten des gleichen Geschäftes sind.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten sowie deren Fokus sind in Tabelle 2-5 zusammengefasst. Bezüglich der Ziele dieser Arbeit kann geschlussfolgert werden, dass Kosten und Erlöse von Flughäfen aufgrund fehlender Berichtstandards und daraus folgender Inkonsistenzen nur bedingt für die Modellierung der Flughafenklassen nutzbar sind. Kapitel 4.2.3 greift diesen Punkt nochmal detaillierter auf. Zur tiefergehenden Beschreibung der Flughafenklassen können Erlöse und Kosten aber herangezogen werden. (siehe Kapitel 4.4).

**Tabelle 2-5: Zusammenfassung der Quellen zu Geschäftsmodellen und betriebswirtschaftliche Ausrichtung.**

	Kommerzielle Erlöse			Verkehrserlöse	Geschäftsmodell
	Inkonsistenz der Angaben	Determinanten	Regional		
<i>Graham</i> [80]	✓	✓	✗	✗	✗
<i>Fasone et al.</i> [88]	✓	✓	✓	✗	✗

## 2.4 Flughäfen und die Rolle der Fluggesellschaften

Generell haben Fluggesellschaften am Markt mit geringer Profitabilität zu kämpfen. Dies liegt zum einen an steigenden Betriebskosten, besonders für Treibstoff, zum anderen am stark gewachsenen Wettbewerb [89] S. 5. Vor allem nach der Deregulierung in den 80er bzw. 90er Jahren (vgl. Kapitel 2.1) entwickelte sich der Luftverkehrssektor zu einem hart umkämpften Verdrängungsmarkt. Etablierte Fluggesellschaften mussten ihre Kosten senken, was zu neuen, innovativen Strategien führte. Es entstanden Computerreservierungssysteme sowie Vielfliegerprogramme, um Kunden an sich zu binden [90] S. 77. Am bedeutendsten war aber die Einführung des *Hub & Spoke* Netzwerks. Bestehende Verbindungen konnten mit einer reduzierten Anzahl an Flügen bei gleichbleibender Netzabdeckung durchgeführt werden und die erheblichen Kosteneinsparungen in Form von niedrigeren Flugpreisen an die Kunden weitergegeben werden. Weiterhin war die Bildung von Allianzen unter den Fluggesellschaften eine Strategie, um einerseits im Zuge der Deregulierung weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben und andererseits Zugang zum globalen Markt zu erlangen, da keine Fluggesellschaft allein diesen riesigen Markt dominieren kann [91], [92].

Fluggesellschaften sind einer der wichtigsten Kunden von Flughäfen. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Stakeholdern des LTS kann als „Zweck-Partnerschaft“ bezeichnet werden. Einerseits sind die Fluggesellschaften abhängig von der Bereitstellung der Infrastruktur durch den Flughafen. Andererseits benötigt der Flughafen die Passagiere der Fluggesellschaften, die nach den Fluggesellschaften selbst die zweitwichtigste Kundengruppe darstellen, um wirtschaftlich effizient agieren zu können. Verschiedene Typen von Fluggesellschaften haben unterschiedliche Ansprüche an den Flughafen, die diesen in der Regel charakterisieren (vgl. Kapitel 2.3.1). Ein Beispiel ist die Ansiedelung eines FSNC, dessen Präsenz an einem Flughafen vor allem historisch bedingt und über einen längeren Zeitraum gewachsen ist. Durch dessen typisches *Hub & Spoke* Netzwerk gewinnt der Flughafen automatisch an kontinentaler und interkontinentaler Bedeutung. Dieser Fakt ist auch ein Grund für heutige Topplatzierungen von US-amerikanischen Flughäfen wie *Atlanta Hartsfield-Jackson* (ATL, Drehkreuz von *Delta Airlines*), *Chicago O'Hare* (ORD, Drehkreuz von *United Airlines* und *American Airlines*) und *Dallas/Fort Worth* (DFW, Drehkreuz von *American Airlines*) gemessen an den Flugbewegungen pro Jahr.

Aufgrund ihrer Größe befinden sich die FSNC dem Flughafen gegenüber in einer Machtposition und können auf bestimmte Entscheidungen Einfluss nehmen [11] S. 4. Ein in diesem Zusammenhang kontrovers diskutiertes Thema ist, ob bei der Festsetzung der regulierten Verkehrsrentgelte die Gewinne aus kommerziellen, also *Non-Aviation* Aktivitäten berücksichtigt werden<sup>43</sup>. Zu unterscheiden sind zwei verschiedene Ansätze. Beim *Single-Till* Ansatz werden sämtliche Bereiche des Flughafens inkl. der *Non-Aviation* Aktivitäten zu Festsetzungen des Entgeltlevels herangezogen. Im Gegensatz dazu erfolgt beim *Dual-Till* Ansatz eine isolierte Betrachtung des Bereichs, der für die Erbringung der Leistung des Lufttransports notwendig ist. Das heißt, Kosten und Erlöse von *Non-Aviation* Aktivitäten werden bei der Festsetzung der Verkehrsrentgelte nicht einbezogen [93].

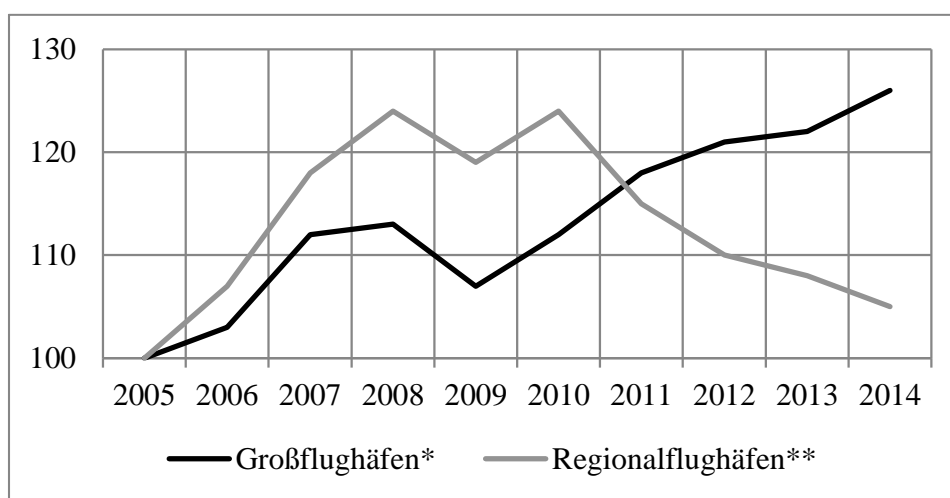
Der Druck auf die etablierten FSNC hat seit Ende der 80er bzw. Anfang der 90er Jahre aufgrund der Konkurrenz durch LCC massiv zugenommen, was am Beispiel des irischen LCC *Ryanair* deutlich wird. Im Mai 1986 bekam *Ryanair* die Lizenz, Flüge zwischen den Flughäfen *Dublin*

---

<sup>43</sup> Weitere Ausführungen hierzu sind in Kapitel 5.2 zu finden.

(DUB) und *London Luton* (LTN) durchzuführen. Bereits am ersten Tag fiel der Ticketpreis von 208 GB£ auf 94,99 GB£ und bis Ende 1990 stieg das Passagieraufkommen von vorher 1 Mio. auf 4,5 Mio. Passagiere [94]. Hauptsächlich im Kurz- und Mittelstreckensegment haben LCC erhebliche Anteile gewonnen. *Ryanair* liegt mit 120 Mrd. Passagierkilometer (PKM) in 2014 nur mit geringem Abstand hinter den etablierten FSNC wie *Lufthansa* (156 Mrd. PKM), *British Airways* (138 Mrd. PKM) und *Air France* (134 Mrd. PKM)<sup>44</sup> [95]. Ihr Geschäftsmodell fokussiert auf die Erbringung der reinen Flugleistung. Diese soll möglichst günstig sein, was über eine einheitliche Flotte mit nur einer Sitzklasse, eine hohe Flugzeugauslastung (erreicht durch eine maximale *Turnaround Time* von 25 Minuten), die Direktvermarktung der Tickets (Ablehnung von Reisevermittlern und Computerreservierungssystemen), eine schlanke Unternehmensstruktur<sup>45</sup>, Gebühren für Sekundärleistungen (Gepäck, Sitzplatz, Essen, etc.), und einen Flugbetrieb von Tertiär-/Regionalflughäfen erreicht wird. Letzteres wird jedoch mehr und mehr aufgeweicht. Sowohl *Ryanair* als auch *easyJet* setzen vermehrt auf Primär-/Sekundärflughäfen, um eine direkte Konkurrenz zu den FSNC aufzubauen und neben preissensitiven Passagieren auch vermehrt Geschäftsleute zu adressieren<sup>46</sup> [53] S. 25, [94], [96], [97], [98].

Die genannten Entwicklungen im Fluggesellschaftsmarkt der vergangenen Dekade haben für Flughäfen in Deutschland unterschiedliche Folgen. Regionalflughäfen<sup>47</sup> haben nach einem rasanten Aufschwung im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts in den vergangenen Jahren mit sinkenden Passagierzahlen zu kämpfen (vgl. Abbildung 2-8).



**Abbildung 2-8: Entwicklung des Passagieraufkommens an deutschen Verkehrsflughäfen<sup>48</sup>, 2005 = 100, in Anlehnung an [99].**

<sup>44</sup> 2016 transportierte *Ryanair* erstmals mehr Passagiere (117 Mio. Passagiere) als die Fluggesellschaften der *Lufthansa Group* zusammengerechnet (110 Mio. Passagiere).

<sup>45</sup> Die Anzahl der Passagiere pro Mitarbeiter liegt bei *Ryanair* bei über 8000 im Vergleich zu durchschnittlich 873 bei nationalen, europäischen Fluggesellschaften [94].

<sup>46</sup> Dies wird durch spezielle Business-Tarife, die Gepäck und Sitzplatzreservierung enthalten, forciert.

<sup>47</sup> Keine einheitliche Definition vorhanden. Nach der u. g. EU-Leitlinie 2014/C 99/03 sind dies Flughäfen mit bis zu 3 Mio. Passagieren pro Jahr.

<sup>48</sup> \* Flughäfen mit mehr als 3 Mio. Passagieren pro Jahr; \*\* Dies sind *Bremen* (BRE), *Dortmund* (DTM), *Dresden* (DRE), *Erfurt* (ERF), *Friedrichshafen* (FDH), *Frankfurt-Hahn* (HHN), *Karlsruhe/Baden-Baden* (FKB), *Leipzig/Halle* (LEY), *Münster/Osnabrück* (FMO), *Weeze* (NRN), *Paderborn/Lippstadt* (PAD) und *Saarbrücken* (SCN). Flughäfen, an denen 2005 noch kein (nennenswerter) Linien- oder Charterverkehr stattfand (z. B. *Memmingen*, FMM), an denen inzwischen keine gewerblichen Linien-

Da nur rund 8 % des Gesamtpassagieraufkommens im Jahr 2014 in Deutschland auf Regionalflughäfen entfielen, erwirtschaften fast alle ein negatives Ergebnis und müssen durch Subventionen gestützt werden. Letztere hat die *EU-Kommission* 2014 mit den „Leitlinien für staatliche Beihilfen für Flughäfen und Luftverkehrsgesellschaften“ klar definiert und eingeschränkt<sup>49</sup>. Im Gegensatz dazu profitieren die größeren deutschen Verkehrsflughäfen von dieser Entwicklung. Die Passagiernachfrage stieg zwischen 2005 und 2014 um ca. 26 % an. Nur 2009, im Jahr der globalen Rezession, ging das Passagieraufkommen zurück. [99], [100]

Diese Ausführungen zeigen, dass die Entwicklung von Flughäfen stark an den Fluggesellschaftsmarkt gekoppelt ist. Aufgrund der Ansiedelung von Fluggesellschaften kann ein Flughafen schnell wachsen und an Bedeutung gewinnen. Aber genauso schnell kann der Flughafen die Passagiere wieder verlieren, wenn sich die Fluggesellschaften entscheiden, einen anderen Flughafen anzufliiegen. Vor allem durch die Standortungebundenheit von LCC können sich Verschiebungen zwischen den Flughäfen ergeben. Deshalb wird in dieser Arbeit ebenso ein Fokus auf die Fluggesellschaften und deren generische Modellierung gelegt (siehe Kapitel 4.3.4).

## 2.5 Neuer Modellansatz

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, existieren bereits Modelle und Werkzeuge, die die operationelle Leistungsfähigkeit von Flughäfen bzw. einzelnen Flughafenelementen betrachten. Weiterhin stehen Arbeiten zur Verfügung, die die generische Modellierung bzw. Nutzung von Clustertechniken zur Klassifizierung von Flughäfen thematisieren (siehe Kapitel 3.2.6).

Der neue Ansatz, der in dieser Arbeit verfolgt wird, liegt zum einen auf der *makroskopischen Modellierung von Flughafenklassen* und daraus folgend der *Bildung generischer Flughafenrepräsentanten*, die zur Bestimmung der quantitativen Ausprägung unterschiedlicher Merkmale von Flughäfen dienen. Zum anderen wird nicht nur auf die Flughäfen selbst eingegangen, sondern auch auf flughafennahe Elemente des LTS wie die Fluggesellschaften und den Flugplan. Des Weiteren werden *Anwendungen für Flughafenrepräsentanten* aufgezeigt und bewertet.

- Im Gegensatz zur Modellierung eines bestimmten Flughafens bzw. eines einzelnen Flughafenelements (mikroskopische Modelle) wird der Fokus bewusst auf das Abstrahieren gelegt. Dieses Vorgehen wirkt der mangelnden Verfügbarkeit von Daten entgegen.
- Die relevante, weltweite Flughafenlandschaft wird betrachtet (vgl. [101]). Die Eingrenzung auf eine geografische Region, wie in ASSET, bei *Öttel et. al.* und bei *Malighetti et al.* ist nicht vorhanden.
- Nicht nur Flughäfen werden in dieser Arbeit generisch abgebildet, sondern auch flughafennahe Elemente, wie die Fluggesellschaften und der Flugplan. In ASSET wurde ein erster Ansatz verfolgt, zwei generische Flughafentypen auf europäischer Ebene zu bestimmen (der Flughafen *Hamburg* als Repräsentant für mittelgroße Flughäfen und der

---

und Charterflüge mehr durchgeführt werden (z. B. *Altenburg-Nobitz*, AOC und *Zweibrücken*, ZQW), an denen das Verkehrsaufkommen 2014 unter 200 000 Passagieren lag (z. B. *Kassel-Calden* (KSF), *Lübeck* (LBC), *Rostock-Laage* (RLG)) und schließlich jene Flughäfen, bei denen nicht für alle Jahre des Betrachtungszeitraums die Zahlen zum Verkehrsaufkommen vorliegen, werden nicht berücksichtigt [99].

<sup>49</sup> Vgl. Amtsblatt der *Europäischen Union* 2014/C 99/03.



Flughafen *Paris-Charles de Gaulle* als Repräsentant für *Hub*-Flughäfen). Jedoch werden einerseits nur landseitige Terminalprozesse betrachtet und modelliert und andererseits wird im Vorhinein eine Definition für die beiden Flughafentypen festgelegt. Das heißt, nicht die Merkmalsausprägungen der Flughäfen bestimmen die Klassenmerkmale. Die zwei modellierten Flugpläne<sup>50</sup> pro Flughafentyp werden vorwiegend für die „Generierung“ von Passagieren über die Zeit genutzt. Hier zeigt diese Arbeit einen verbesserten Ansatz (siehe auch Punkt 5 dieser Aufzählung).

- Im Gegensatz zur Arbeit von *Azzam* werden für die Klassifizierung nicht nur Merkmale des Netzwerks betrachtet, sondern auch operationelle Merkmale (z. B. Frachtvolumen, Anteil der Umsteiger) und Infrastrukturmerkmale (z. B. Anzahl der SLB). *Malighetti et al.* nutzen ähnliche Merkmale nur auf europäischer Ebene. Ein spezifischer Mehrwert der vorliegenden Arbeit liegt in der Einbeziehung bzw. Betrachtung von ökonomischen Merkmalen der Flughäfen.
- Ein flughafennahes Element ist der Flugplan. Nach Abschluss der Flughafenklassifizierung wird auf Basis der realen Flugpläne der Flughäfen, die eine Klasse bilden, ein sogenannter generischer Flugplan modelliert. Dies spiegelt eine künstliche Nachfrage für die Flughafenrepräsentanten wider.
- Die Arbeit betrachtet des Weiteren die zukünftige Entwicklung einzelner Merkmale, insbesondere die Entwicklung der Flugbewegungen, die eine wichtige Basis zur Bestimmung von Verkehrserlösen darstellen.

---

<sup>50</sup> Dem Autor des ASSET-Berichts zur Folge bilden (ältere) Flugpläne des Flughafens Hamburg, die leicht angepasst wurden, die Basis für die Flugpläne.

## 3 Modellierungstechniken - Definitionen und Grundlagen

Die makroskopische Modellierung von Flughafenklassen und daraus folgend die Bildung generischer Flughafenrepräsentanten (vgl. Kapitel 2.5) wird mittels einer Clusteranalyse, ein multivariates Verfahren, durchgeführt. Neben der Clusteranalyse ist die sogenannte *Fuzzy-Logik*<sup>51</sup> ein weiteres, mögliches Verfahren zur Modellierung. Übersetzt heißt *Fuzzy* so viel wie flaumig, struppig, verschwommen oder unscharf. Die *Fuzzy-Logik* beschäftigt sich demnach mit allen Problemen, die mit unscharfen Aussagen und unscharfen Schlüsse zusammenhängen. In Verbindung mit einer exakten mathematischen Theorie sollen sinnvolle Lösungen für Entscheidungs- und Regelungsprobleme gefunden werden. Die *Fuzzy-Logik* geht also davon aus, dass alles nur zu einem bestimmten Grad zutrifft und berücksichtigt somit die Elastizität des Wahrheitswertes von Aussagen („ziemlich windig“, „fast vollständig“, „kaum getragen“). [102] S. 161 f Weiterhin können auch künstliche neuronale Netze (*Artificial Neural Networks*) eine Alternative zur Clustertechnik darstellen, worauf in Kapitel 7.3 näher eingegangen wird.

Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf hierarchisch, agglomerativen Clusterverfahren, die im späteren Verlauf (siehe Kapitel 4) zur Anwendung kommen. Auf die Gründe hierfür sowie auf die Erläuterung von grundlegenden Begrifflichkeiten und Methoden bezüglich der Clusteranalyse wird im Folgenden näher eingegangen (Kapitel 3.2). Des Weiteren werden zunächst der System- und Modellbegriff (Kapitel 3.1) erläutert. Mit Fokus auf die Verwendung im Kontext des Luftverkehrs analysiert Kapitel 3.2.6 den Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Anwendung solcher Clustertechniken. Es folgen im Kapitel 0 Beschreibungen zu statistischen Methoden und abschließend werden relevante Datenquellen (Kapitel 3.4) aufgezeigt, die für diese Arbeit zur Verfügung stehen bzw. genutzt werden.

### 3.1 System- und Modellbegriff

Ein System besteht aus Elementen, die durch Beziehungen untereinander verbunden sind. Die Elemente können hierbei als Bausteine verstanden werden, die wiederum eigenständige Subsysteme bilden können. Die Beziehungen zwischen den Bausteinen können vielfältig ausfallen, unter anderem auf Basis von Informations- oder Materialflüssen. [104] S. 5–7

*Bossel* [105] S. 35 wiederum setzt drei Merkmale<sup>52</sup> voraus, um bei einem Objekt von einem System sprechen zu können:

- 1) *Systemzweck*: Das Objekt erfüllt eine bestimmte Funktion. Ein Beobachter kann den Zweck eines Systems in ihm erkennen.
- 2) *Systemstruktur*: Das Objekt ist aus einer Reihe von Systemelementen und deren Wechselbeziehungen untereinander aufgebaut, welche zusammen die Funktion des Objektes bestimmen (ähnlich der o. g. Definition).

---

<sup>51</sup> Eine Einführung in *Fuzzy-Logik* geben *Friedrich* [102] und *Bede* [103].

<sup>52</sup> Diese Merkmale gelten insbesondere für technische Systeme und diese sind nicht eins zu eins auf andere (z. B. biologische) Systeme übertragbar.

- 3) *Systemintegrität*: Eine Teilung des Objektes ist nicht möglich. Das heißt, sobald ein Element oder eine Beziehung entfernt wird, kann das Objekt seinen Systemzweck nicht mehr erfüllen. Die Systemidentität verändert sich oder geht gänzlich verloren.

Die Systemgrenze isoliert das System physisch und/oder gedanklich von seiner Umwelt. Je nachdem wie diese Grenze definiert ist, bestimmt sie den Komplexitätsgrad sowie die Untersuchbarkeit eines Systems. Dabei kann sie stellenweise unscharf sein, denn die Umwelt beeinflusst über Systemeintrwirkungen das System und umgekehrt (Systemauswirkungen) [104] S. 6. Solche Systeme werden auch als *offene Systeme* bezeichnet, wie z. B. das LTS [106] S.11. Im Gegensatz dazu wird ein System, das nicht mit seiner Umgebung wechselwirkt, als abgeschlossen bzw. isoliert bezeichnet<sup>53</sup>. [105] S. 37

Im Allgemeinen sind Systeme dynamisch, das heißt, sie zeigen eine Zustandsänderung innerhalb eines betrachteten Zeitraumes. Um verlässliche Ergebnisse über das Verhalten eines Systems zu erlangen, sind Beobachtungen unter Einfluss unterschiedlicher Umweltbedingungen notwendig. Als Hilfsmittel dienen hierbei Modelle, die „eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ sind [107]. Entwickelt werden Modelle, da Experimente am Original oftmals nicht möglich oder zu kosten- und zeitaufwendig sind bzw. den Betriebsablauf stören. Sie dienen als Hilfsmittel, um reale Systeme und deren Verhalten untersuchen und erklären zu können. Im Zuge dessen sind sie auf einen bestimmten Zweck ausgerichtet, erfassen nur die untersuchungsrelevanten Eigenschaften und unterstützen bei der Lösung einer bestimmten Problemstellung.

Weiterhin ist der Begriff der Komplexität<sup>54</sup> mit dem Systembegriff verbunden und eine Vielzahl von Wissenschaftsgebieten (siehe [108]) beschäftigen sich mit diesem Zusammenhang. Fächerübergreifend wird der Frage nachgegangen, wie durch Wechselwirkungen von Systemelementen, einerseits Struktur und Ordnung entsteht, aber andererseits auch Chaos und Zusammenbrüche hervorgerufen werden. Diese Zustände entstehen in kritischen Phasen, die von den Kontrollparametern<sup>55</sup> eines Systems abhängen. Langfristig wird ein dynamisches System unabhängig von seinen Anfangsbedingungen in einen bestimmten Zustand hineingezogen. Dieser Zustand wird auch als Attraktor<sup>56</sup> bezeichnet. [108] S.10, [108] S. 118

Die Komplexität eines Systems steigt mit der Anzahl an Elementen, der Anzahl an Verknüpfungen sowie der Funktionalität und Unüberschaubarkeit dieser Verknüpfungen<sup>57</sup>. Wie oben erwähnt, ist das LTS ein komplexes System, was wiederum eine hohe Verwundbarkeit durch externe Schocks nach sich zieht (vgl. [90] S. 1). Kleine Veränderungen können globale Auswirkungen haben.

---

<sup>53</sup> In Realität besteht aber keine Möglichkeit der vollständigen Isolation.

<sup>54</sup> Laut *Duden* bedeutet Komplexität so viel wie Vielschichtigkeit oder das Ineinander vieler Merkmale.

<sup>55</sup> Parameter, von dem ein dynamisches System abhängt. Eine Veränderung des Parameters kann entweder zur Selbstorganisation aber auch zu Chaos führen [108] S. 121.

<sup>56</sup> Z. B. entspricht ein Gleichgewichtszustand einem Fixpunkt-Attraktor. Lineare Systeme besitzen nur Fixpunkt-Attraktoren. Nichtlineare Systeme besitzen auch Grenzzyklen, in denen sich bestimmte Zustände periodisch wiederholen [108] S. 118.

<sup>57</sup> Weitere Ausführungen zu Komplexität und Information/Entropie sind in [108] S. 32 f zu finden.

## 3.2 Grundlagen der Clusteranalyse

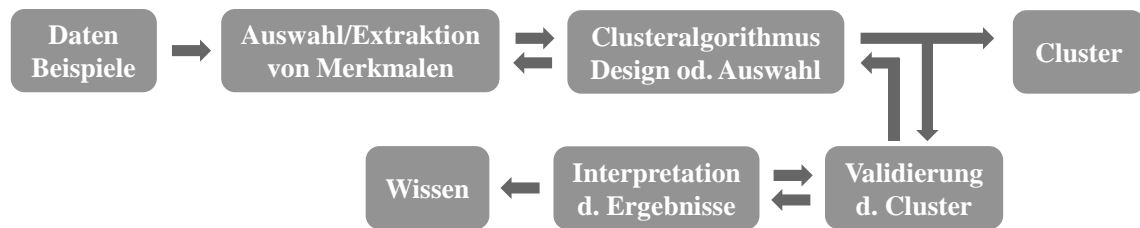


Abbildung 3-1: Vorgehen bei der Clusteranalyse, in Anlehnung an [109] S. 646.

Das Clustern, auch *Explorative Datenanalyse* (EDA) genannt, gehört zu den Methoden des unüberwachten Lernens, der Versuch des Findens einer verborgenen Struktur in ungekennzeichneten Daten [109], [110]. Somit gehört das Clustern zu den strukturentdeckenden Verfahren, einer Teilmenge der multivariaten Verfahren<sup>58</sup>. Der Clusteralgorithmus, zentrales Element der Clusteranalyse, dient zur Bildung von Gruppen, wobei die Objekte einer Gruppe eine maximale Ähnlichkeit zueinander aufweisen und zu Objekten anderer Gruppen minimal ähnlich sind [111]. Das Ziel ist die Ausprägung einer Gruppe mit homogenen Merkmalen und gleichzeitig heterogenen Merkmalen im Vergleich mit anderen Gruppen. Die Clusteranalyse nimmt damit eine Vorbereitungsfunktion für weiterführende Analysen ein [112].

In der Literatur wird eine Vielzahl von Algorithmen zur Clusteranalyse beschrieben. Jedoch gilt, dass es keinen Algorithmus gibt, der universell zur Lösung aller Problemstellungen genutzt werden kann. Eine gute Übersicht zeigt Abbildung 3-3 und liefern weiterhin [109] und [113]. Übergeordnetes Ziel der Clusteranalyse ist die Reduktion der Komplexität [112]. Abbildung 3-1 zeigt das allgemeine Vorgehen bei einer Clusteranalyse. Die einzelnen Schritte, auf die im Folgenden näher eingegangen wird, sind eng miteinander verbunden und bestimmen die Ableitung der Cluster. Im Folgenden wird zunächst das Vorgehen beschrieben, das später in den Kapiteln 4.2.3/4.2.4 bzw. Kapiteln 4.3.2/4.3.3 angewendet wird

### 3.2.1 Auswahl/Extraktion von Merkmalen

Zunächst muss eine Auswahl von Merkmalen vorgenommen werden, die bei der Klassifizierung zur Anwendung kommt. Zum einen steigt der Rechenaufwand mit größer werdender Anzahl an Merkmalen, zum anderen besteht das Risiko, dass die Anzahl der gefundenen Cluster über dem interpretierbaren Maß liegt bzw. diese sich kaum voneinander unterscheiden [101]. Vor der Auswahl von Merkmalen (engl. *Feature Selection*) wird zusätzlich eine Kategorisierung von Merkmalen vorgenommen. Bei der später hier angewandten Clusteranalyse soll, wenn möglich, mindestens ein Merkmal jeder Kategorie herangezogen werden. Abschließend wird die Anzahl der Merkmale durch eine Korrelationsanalyse weiter reduziert (siehe Abbildung 3-2). Im Allgemeinen ist die Anzahl der Merkmale gering zu halten und dennoch sind nach Möglichkeit alle Hauptcharakteristiken des Untersuchungsobjektes in die Analyse einfließen zu lassen.

<sup>58</sup> Weiterhin gehören strukturprüfende Verfahren zu den multivariaten Verfahren. Ein bekannter Vertreter ist die Regressionsanalyse.



Abbildung 3-2: Vorgehen bei der Extraktion von Merkmalen.

### Korrelationskoeffizienten

Der Korrelationskoeffizient  $r$  nach *Bravais-Pearson* ergibt sich aus der Division der empirischen Kovarianz  $s_{XY}$  durch das Produkt der Standardabweichungen  $s_X$  bzw.  $s_Y$  der beiden Merkmale.  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  entsprechen den Mittelwerten der jeweiligen Merkmale. Diese Methode kann aber nur lineare Zusammenhänge erfassen. [114] S. 134

$$r_{\text{Bravais-Pearson}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y} \quad (3.1)$$

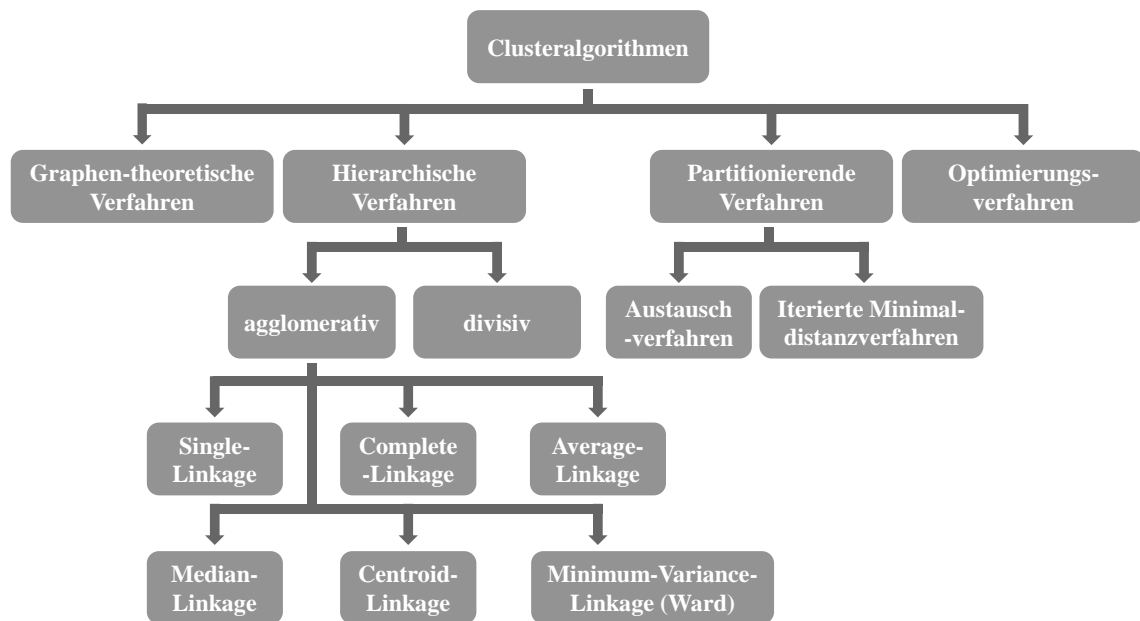
Um nicht die Stärke des linearen, sondern monotonen Zusammenhangs festzustellen, ist eine Korrelationsanalyse nach *Spearman* anzuwenden. Den ursprünglichen x- und y- Werten wird, unabhängig voneinander, der Rang  $rg$  zugeordnet, den diese bei größenmäßiger Anordnung annehmen. [114] S. 142

$$r_{\text{Spearman}} = \frac{\sum (rg(x_i) - \bar{rg}_X)(rg(y_i) - \bar{rg}_Y)}{\sqrt{(\sum (rg(x_i) - \bar{rg}_X)^2)(\sum (rg(y_i) - \bar{rg}_Y)^2)}} \quad (3.2)$$

Der Korrelationskoeffizient  $r$  kann Werte zwischen -1 bis 1 annehmen, wobei  $r = 1$  den Extremfall eines gleichsinnig linearen Zusammenhangs und  $r = -1$  eines gegensinnig linearen Zusammenhangs darstellt. Im Falle von  $r \approx 0$  liegt kein linearer Zusammenhang bzw. keine Korrelation vor. Ein betragsmäßig hoher Korrelationskoeffizient muss aber nicht auf einen Kausalzusammenhang der beiden Merkmale hindeuten. Hierfür sind sachlogische Überlegungen notwendig.

### 3.2.2 Arten von Clusteralgorithmen

Abbildung 3-3 zeigt eine Übersicht von verschiedenen Clusteralgorithmen. Einer der häufig genutzten Algorithmen ist das hierarchische Clusterverfahren, wobei zwischen einer agglomerativen und divisiven Vorgehensweise unterschieden wird. Agglomerativ heißt, dass zu Beginn der Untersuchung jedes Objekt einen eigenen Cluster bildet und diese schrittweise zu größeren Clustern zusammengefasst werden. Nach dem letzten Schritt sind alle Objekte zu einem einzigen Cluster vereinigt. Das gegenteilige, seltener angewandte Vorgehen wird als divisiv bezeichnet. Vorteile des hierarchischen Verfahrens sind die Flexibilität in Bezug auf die Anzahl der Cluster und die Unabhängigkeit von Startbedingungen. Nachteilig wirkt sich aus, dass keine Neuordnung nach erstmaliger Clusterzuordnung erfolgt, so dass das Ergebnis nicht optimal ist. Vertreter des hierarchischen Clusterverfahrens werden in Kapitel 3.2.4 näher erläutert.



**Abbildung 3-3: Einteilung von Clusteralgorithmen<sup>59</sup> mit Fokus auf hierarchisch, agglomerativen Verfahren [115], [111].**

Bei den partitionierenden Verfahren (einer der bekanntesten Vertreter ist der *k-Means* Algorithmus) wird zu Beginn der Untersuchung eine Startklassifizierung mit  $n$  Clustern festgelegt. Es folgt ein iterativer Optimierungsprozess, das heißt eine Verschiebung von Objekten zu anderen Cluster, bis ein Optimum gefunden ist. Diese Optimierung spiegelt den größten Vorteil der partitionierenden Verfahren wider. Nachteilig wirkt sich die vorzugebende Anzahl der Cluster aus, die zu Beginn der Untersuchung nur schwer einzuschätzen ist, und die zufällige Verteilung der Clusterschwerpunkte zu Beginn der Klassifizierung, da somit bei jedem Durchgang ein anderes Ergebnis erzielt werden kann. Die Auswahl eines Clusteralgorithmus ist im Allgemeinen mit der Auswahl eines korrespondierenden Ähnlichkeits- bzw. Proximitätsmaßes (Kapitel 3.2.3) und eines Fusionsalgorithmus (*Linkage Rule*, Kapitel 3.2.4) kombiniert.

Tabelle 3-1 fasst Vor- und Nachteile von ausgewählten Clusteralgorithmen zusammen, die in der Literatur aufgeführt werden. Der Schwerpunkt ist hier auf hierarchische und partitionierende Verfahren gelegt. Weitere Clusteralgorithmen sind Graphen-theoretische Verfahren und Optimierungsverfahren, die hier nicht näher betrachtet werden.

<sup>59</sup> Diese Übersicht wird als nicht vollständig angesehen.

**Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von ausgewählten Clusteralgorithmen;**  
✓ Übereinstimmung, ✗ Ablehnung.

	Anwendung auf große Datensätze	Neuzuweisung der Objekte	Optimierungs-Algorithmus	Abhängig von Startbedingungen (z. B. Clusteranzahl)	Sensitiv gegenüber Ausreißern	Tendenz zu Clusterformen	Flexibilität ggü. des Granularitätslevels	Gute Interpretierbarkeit der Cluster
<b>Hierarchische Verfahren</b>		✗ [101], [113]	✗ [101]	✗ [101]		✓ [113]	✓ [101], [113]	
<i>Agglomerative Algorithmen</i>								
Single Linkage						✓ [112]		
Ward Linkage					✗ [101] ✓ [116]			
<b>Partitionierende Verfahren</b>	✗ [117]		✓ [101]	✓ [101]				
<i>Exklusives Clustern</i>								
K-medoids					✗ [113]			
K-means				✓ [101], [113]	✓ [113]			
<i>Wahrscheinlichkeits-Clustern</i>								✓ [113]
<b>Dichtebasierte Verfahren</b>					✗ [117]	✓ [113], [117]		✗ [113]

### 3.2.3 Ähnlichkeits- bzw. Proximitätsmaß

Die Wahl des Ähnlichkeits- bzw. Proximitätsmaßes  $d$  ist abhängig von der Skalierungsform der Objekte (vgl. Abbildung 3-4). Bei kardinalskalierten<sup>60</sup> Größen wird die Distanz (der Abstand) zwischen den Objekten genutzt, die sich auf Basis der *verallgemeinerten Minkowski-Metrik*<sup>61</sup>

<sup>60</sup> Die Kardinalskala ist ein Skalenniveau, das wiederum in eine Intervallskala und eine Verhältnisskala unterteilt werden kann. Bei beiden Skalen kann die Häufigkeit der Objekte, die Reihenfolge der Objekte und der Abstand zwischen den Objekten festgelegt bzw. gemessen werden. Im Vergleich zu der Intervallskala existiert bei der Verhältnisskala ein absoluter Nullpunkt (z. B. bei Längenmaßen). Im Gegensatz dazu kann bei der Ordinalskala nur die Häufigkeit und Reihenfolge und bei der Nominalskala nur die Häufigkeit bestimmt werden.

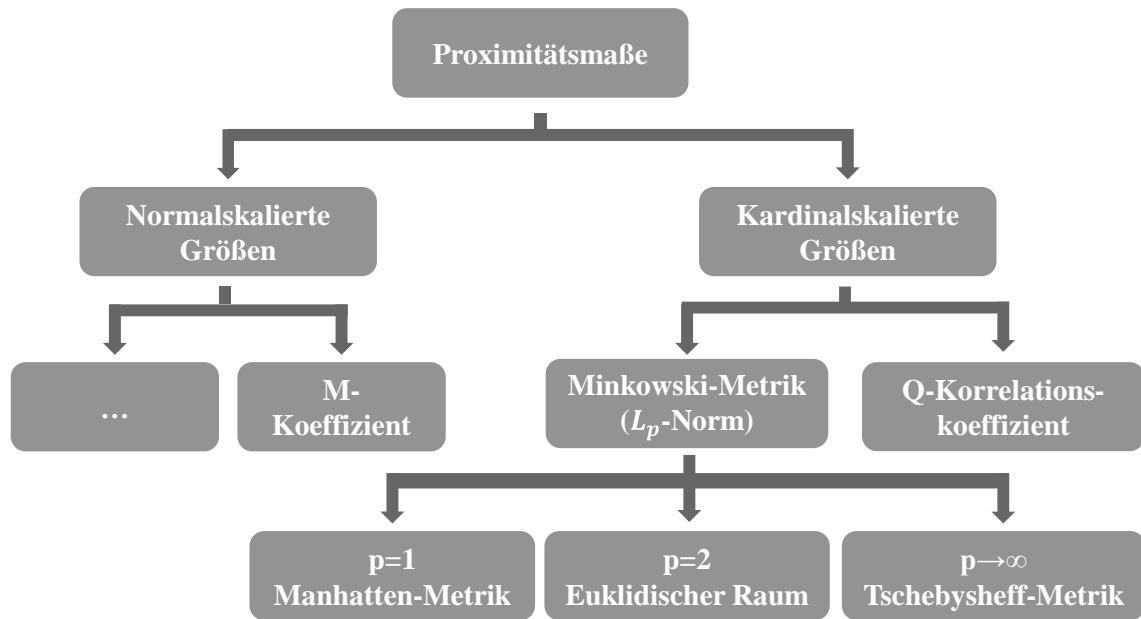


Abbildung 3-4: Ähnlichkeits- bzw. Proximitätsmaße.

$$d(q, r)_{g, g^*} = \left[ \sum_i |x_{gi} - x_{g^*i}|^r \right]^{1/q} \quad (3.3)$$

berechnen lässt, indem für die Parameter  $q$  und  $r$  der Metrik entsprechende Werte eingesetzt werden [111] S. 219.

City-Block-Metrik<sup>62</sup>: 
$$d(r = 1, q = 1)_{g, g^*} = \sum_i |x_{gi} - x_{g^*i}| \quad (3.4)$$

Euklidische Distanz: 
$$d(r = 2, q = 2)_{g, g^*} = \sqrt{\sum_i (x_{gi} - x_{g^*i})^2} \quad (3.5)$$

Quadrierte Euklidische Distanz: 
$$d(r = 2, q = 1)_{g, g^*} = \sum_i (x_{gi} - x_{g^*i})^2 \quad (3.6)$$

Tschebyscheff-Metrik<sup>63</sup>: 
$$d(r = \infty, q = \infty)_{g, g^*} = \max_i |x_{gi} - x_{g^*i}| \quad (3.7)$$

Hierbei entsprechen  $x_g$  und  $x_{g^*}$  den konkreten Merkmalsausprägungen der Objekte. Die Wahl von  $r$  beeinflusst die Gewichtung der Unterschiede in den einzelnen Variablen. Je größer der Parameter  $r$  der Metrik gewählt wird, desto größer werden Unterschiede in weniger Variablen stärker gewichtet als kleine Unterschiede in vielen Variablen [111] S. 220<sup>64</sup>.

<sup>61</sup> Bei der (gewöhnlichen) Minkowski-Metrik ist  $q = r$ , so dass die sogenannten Metrikeigenschaften (vgl. [118] S. 282) gewährleistet sind [111] S. 219.

<sup>62</sup> Auch als Manhattan-Metrik oder Manhattan-Distanz bezeichnet.

<sup>63</sup> Auch als Dominanz- oder Supremums-Metrik bezeichnet [119] S. 458.

<sup>64</sup> Ein anschauliches Beispiel führt Bacher [111] S. 220 f. aus.



*Beispiel<sup>65</sup>: Bei zwei Flughäfen A und B sind für fünf Merkmale die folgenden Werte ermittelt worden:*

A: 5 4 9 7 12

B: 2 7 4 9 10

*Es ergibt sich nach Formel (3.3)*

*für  $r = 1, q = 1$  eine Distanz von  $d_{AB} = |5 - 2| + \dots + |12 - 10| = 15$ ,*

*für  $r = 2, q = 2$  eine Distanz von  $d_{AB} = \sqrt{(5 - 2)^2 + \dots + (12 - 10)^2} = 7,14$ ,*

*für  $r = 2, q = 1$  eine Distanz von  $d_{AB} = (5 - 2)^2 + \dots + (12 - 10)^2 = 51$ ,*

*für  $r = \infty, q = \infty$  eine Distanz von  $d_{AB} = 9 - 4 = 5$ .*

Die *City-Block-Metrik* entspricht der Distanz, die z. B. ein Taxifahrer in einer Stadt mit rechtwinklig zueinander verlaufenden Straßen von A nach B zurücklegen muss. Die *Euklidische Distanz* ist gleich der Luftliniendistanz und den menschlichen Alltagserfahrungen bezüglich Distanzen [120] S. 99. In der Praxis, wie auch in dieser Arbeit, wird jedoch oft die *quadrierte Euklidische Distanz* verwendet. Im Gegensatz dazu sind Distanzen nach der *Tschebysheff-Metrik* für die meisten clusteranalytischen Fragestellung nicht von Bedeutung. [119] S. 457

Zur Vermeidung des Einflusses von Merkmalen mit großen Werten, die bei der Klassifizierung Merkmale mit kleineren Werten überlagern, werden die Daten im Vorfeld der Clusteranalyse aufbereitet bzw. transformiert.

Ein Standardverfahren hierfür ist die *z-Score Normierung* (auch *z-Transformation<sup>66</sup>* genannt). Bei dieser Art der Normierung wird zunächst das arithmetische Mittelwert der Objekte eines Merkmals  $\bar{x}$  von jedem Objekt subtrahiert und anschließend diese Differenz durch die Standardabweichung der Objekte eines Merkmals  $s_x$  dividiert (siehe Formel (3.8)). Dieses Verfahren eignet sich besonders für normalverteilte Variablen. [101]

$$x^* = \frac{x - \bar{x}}{s_x} \quad (3.8)$$

Die paarweisen Distanzen zwischen allen Untersuchungsobjekten lassen sich abschließend in einer Distanzmatrix (siehe Tabelle 3-2) zusammenfassen. Die kleinste Distanz  $d$  innerhalb der Matrix bestimmt, welche beiden Objekte (oder Cluster) im aktuellen Iterationsschritt zu einem neuen Cluster zusammengefasst werden (fusionieren).

**Tabelle 3-2: Beispielhafte Distanzmatrix.**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt n
Objekt 1	0	$d_{12}$	$d_{1n}$
Objekt 2	$d_{21}$	0	$d_{2n}$
Objekt n	$d_{n1}$	$d_{n2}$	0

<sup>65</sup> In Anlehnung an: [119] S. 456 f.

<sup>66</sup> Siehe [119] S. 35.

### 3.2.4 Hierarchisch, agglomerativer Fusionsalgorithmus (*Linkage Rule*)

Der hierarchisch, agglomerative Algorithmus läuft nach folgendem Prinzip ab [111] S. 233:

- 1) Jedes Objekt bildet anfangs einen eigenständigen Cluster (siehe Abbildung 3-5, links oben). Die Clusteranzahl  $K$  ist gleich der Anzahl zu klassifizierender Objekte.
- 2) Das Objektpaar  $(\{p\}\{q\})$  mit der größten Ähnlichkeit wird mit Hilfe des Ähnlichkeitsmaßes bestimmt, zu einem neuen Cluster  $\{p, q\}$  fusioniert und die Clusterzahl  $K$  wird um eins reduziert ( $K = K - 1$ ).
- 3) Wenn  $K = 1$  ist, wird der Algorithmus beendet, da alle Objekte einem einzigen Cluster angehören (siehe Abbildung 3-5, links unten). Andernfalls wird mit dem 4. Schritt fortgefahren.
- 4) Die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit des neu gebildeten Clusters  $\{p, q\}$  zu den verbliebenen Clustern  $i$  wird berechnet. Eine neue Distanzmatrix unter Berücksichtigung der Fusionierung zweier Cluster wird erstellt.
- 5) Der Algorithmus wird beim 2. Schritt fortgesetzt.

Alle hierarchisch, agglomerativen Algorithmen folgen diesem Prinzip und unterscheiden sich nur dadurch, wie im 4. Schritt die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit neu berechnet wird<sup>67</sup>.

Beim *Single-Linkage* Algorithmus bestimmt die Distanz zwischen den beiden am nächsten gelegenen Objekten über die Ähnlichkeit zweier Cluster. Der Algorithmus ist zum Auffinden lang gestreckter und fadenförmiger Cluster gut geeignet, die von anderen Algorithmen gar nicht oder unzureichend erkannt werden. Dies ist aber gleichzeitig auch der größte Nachteil. Es können zwei stark heterogene Cluster fusionieren, obwohl sich in beiden Clustern nur zwei Objekte ähneln. Vorteil und Hauptanwendungszweck des *Single-Linkage* Algorithmus ist das Auffinden von Ausreißern, da Objekte mit extremen Unterschieden erst am Ende fusioniert

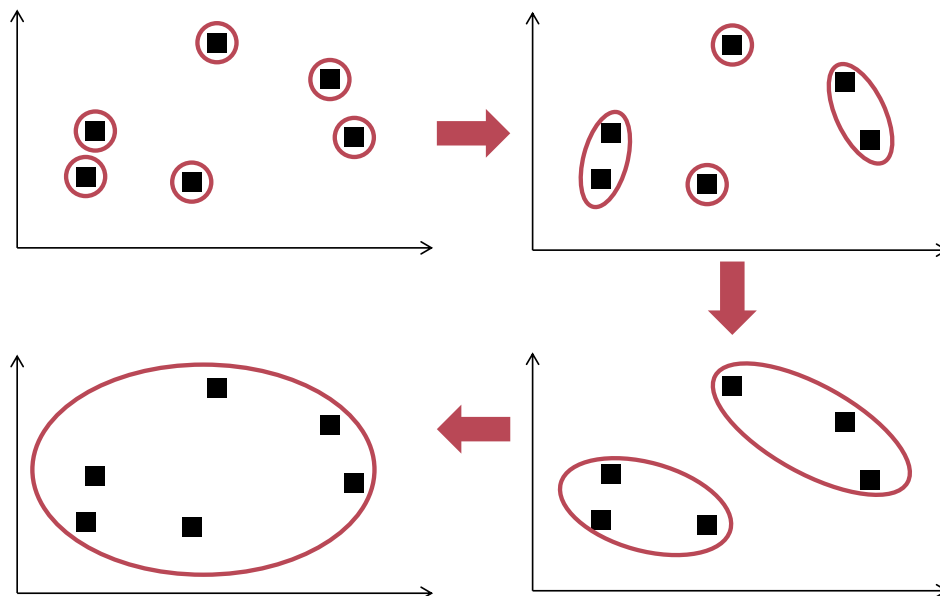


Abbildung 3-5: Schematischer Ablauf eines hierarchisch, agglomerativen Clusterverfahrens.

<sup>67</sup> Die mathematischen Formeln zu den verschiedenen hierarchisch-agglomerativen Algorithmen sind in Anhang B zu finden.

werden. Im Gegensatz dazu wird beim *Complete-Linkage* die maximale Distanz eines Objektpaars zur Bestimmung der Ähnlichkeit herangezogen, was zur Bildung kompakter Cluster etwa gleicher Größe führt. Nachteil dieses Verfahren ist, dass es sensibel auf Ausreißer reagiert. Somit ist ein Voranschalten des *Single-Linkage* empfehlenswert. Den Nachteil der Sensibilität gegenüber Ausreißern gleicht der *Average-Linkage*<sup>68</sup> Algorithmus aus. Wie der Name impliziert wird der Mittelwert zwischen allen Objektpaaren zur Ähnlichkeitsbestimmung gebildet. Vergleichbar mit diesem Verfahren ist das *Centroid-Linkage* Verfahren. Die Distanz wird auf Basis der Klassenschwerpunkte (Zentren) bestimmt. Der Rechenaufwand verringert sich dadurch im Vergleich zum *Average-Linkage* Verfahren erheblich, da nicht die Mittelwerte zwischen allen Objektpaaren, sondern nur zwischen den Klassenschwerpunkten bestimmt werden müssen [112] S. 27 ff, [101] S. 66 f

Ein weiteres Verfahren ist das *Minimum Variance Linkage* oder *Ward-Linkage*. Es erfolgt die Fusionierung des Clusterpaars, das den geringsten Anstieg der Fehlerquadratsumme<sup>69</sup> verursacht und somit eine maximale Homogenität pro Zeitschritt gewährleistet. Vorteil des *Ward-Linkage* Verfahrens ist die geringe Anfälligkeit gegenüber Ausreißern. Gleichzeitig tendiert es zur Bildung von Clustern gleicher Größenordnung sowie Clustern mit einer geringen Anzahl an Elementen [121] S. 55. Die Anwendung des *Ward-Linkage* beschränkt sich auf metrisch skalierte Merkmale<sup>70</sup> und als Ähnlichkeitsmaß ist nur die quadrierte Euklidische Distanz anwendbar. Alle Algorithmen haben gemeinsam, dass sich dieser Vorgang iterativ fortsetzt, bis das Abbruchkriterium, hier die Fusionierung zu einem einzigen Cluster, erreicht wird. [112] S. 27 ff, [101] S. 66 f

Die Wahl eines adäquaten Clusteralgorithmus hängt maßgeblich von den Objekten ab, die untersucht werden sollen [116] S. 340. Es gibt nicht eine Vorgehensweise, die für alle Analysen anwendbar ist. Deshalb ist es wichtig eine Grundvorstellung von dem Ergebnis und Vorwissen in der Thematik zu haben.

In dieser Arbeit kommt das hierarchisch, agglomerative *Ward-Linkage* Verfahren zum Einsatz (vgl. Kapitel 4.2.4 und 4.3.3), so dass im Folgenden nur auf Vertreter dieses Verfahrens näher eingegangen wird. Dieses Verfahren stellte sich nach mehreren Analysen mit verschiedenen Fusionsalgorithmen als robust und geeignet für diese Stichprobe heraus, weil eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist und keine Einflussnahme durch Vorgabe von Clusterschwerpunkten zu Beginn der Klassifizierung (wie bei den partitionierenden Verfahren das Fall ist) stattfindet. Die Recherche zum Stand der Wissenschaft (vgl. Kapitel 3.2.6) zeigt obendrein, dass das *Ward-Linkage* einer der am häufigsten genutzten Fusionsalgorithmen beim Clustern ist.

### 3.2.5 Clusteranzahl und Auswertung der Clusteranalyse

Zur Bestimmung der Clusteranzahl muss ein Kompromiss zwischen Homogenität und Interpretierbarkeit gefunden werden. Auf der einen Seite weisen die Cluster bei einer ausgeprägten Fusion der Objekte (wenige Cluster) eine große Heterogenität auf und lassen schließlich kaum bzw. keine Interpretation der Ergebnisse zu. Auf der anderen Seite, wenn die

---

<sup>68</sup> Auch als *Unweighted Pair Group Method Using Arithmetic Averages* (UPGMA) bekannt.

<sup>69</sup> Dies entspricht der minimalen Erhöhung der Varianz.

<sup>70</sup> Beim metrischen Skalenniveau (Verhältnisskala) existiert im Unterschied zur Intervallskala ein absoluter Nullpunkt (z. B. Temperaturskala, Lebensalter).

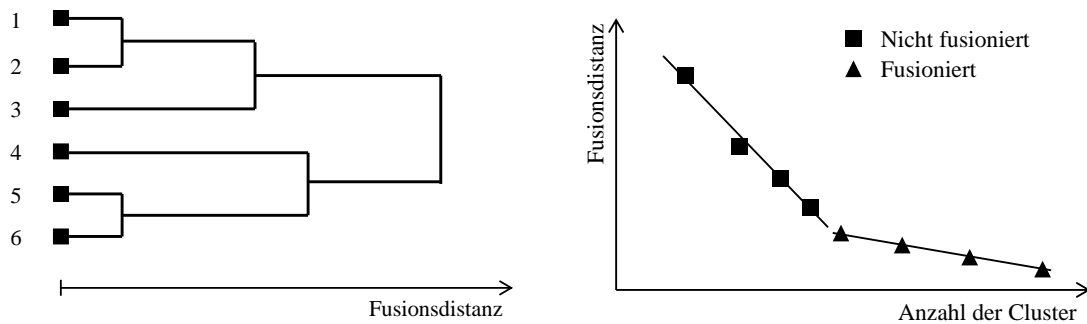


Abbildung 3-6: Schematisches Dendrogramm (links) und Struktogramm (rechts).

Objekte nicht stark genug fusioniert werden, sind die Cluster zwar homogen, aber aufgrund der großen Anzahl ebenfalls kaum interpretierbar, weil eine Fusion ähnlicher Cluster nicht stattgefunden hat.

In erster Linie werden zur Bestimmung der Clusteranzahl visuelle Hilfsmittel herangezogen. Eines ist das *Dendrogramm*, wobei die Clusterbildung mittels binärem Hierarchiebaum abgebildet wird (Abbildung 3-6, links). Auf der Ordinatenachse sind die einzelnen Objekte abgebildet, die die „Blätter“ des Baums repräsentieren. Bei jedem inneren Knoten fusionieren zwei Cluster bis schließlich an der „Wurzel“ nur ein einziger Cluster vorliegt. Der Abszissenwert spiegelt die Fusionsdistanz (*Linkage Distance*) zwischen zwei Objekten wider. Steigt diese sprunghaft an, das heißt, der „Ast“ des Hierarchiebaums bis zur nächsten Verzweigung ist sehr lang, liegt eine unverhältnismäßig große Distanz zwischen den fusionierenden Cluster vor. Die Homogenität nimmt stark ab und auf ein weiteres Zusammenführen der Cluster sollte verzichtet werden. [101]

Unterstützend kann das Struktogramm (auch Evaluationsgraph genannt, Abbildung 3-6 rechts), die Darstellung der Clusteranzahl über die Fusionsdistanz herangezogen werden. Die Homogenitätszunahme bei steigender Clusteranzahl ist direkt ablesbar. Ein Nachteil solcher visuellen Hilfsmittel ist, dass die Anzahl der Cluster durch den (menschlichen) Nutzer bestimmt wird, also subjektiv Einfluss genommen wird. Um diesen Umstand zu vermeiden, entwickelten *Salvador und Chan* [117] einen Algorithmus zur Bestimmung der Clusteranzahl für hierarchische Clusteralgorithmen. Sie nutzten die sogenannte *L method* um den Knick in einem Struktogramm numerisch zu bestimmen. Die Nutzung des Knicks ist weit verbreitet, da hier eine Balance zwischen den Clustern herrscht, die einerseits in sich homogen und andererseits unähnlich zueinander sind.

Die *L method* nutzt die Tatsache aus, dass die Bereiche links und rechts des Knicks oft annähernd linear verlaufen. Das Ziel des Algorithmus ist, die zwei Geraden zu finden, die die Datenpunkte links ( $L_c$ ) und rechts ( $R_c$ ) des Knicks am besten widerspiegeln (exemplarisch rechts in Abbildung 3-6 veranschaulicht). Jede Gerade muss an einem Ende der Kurve starten und beide Geraden müssen zusammen betrachtet alle Datenpunkte enthalten. Die minimale Anzahl an Datenpunkten beträgt zwei und die maximale Anzahl  $b$ , was der Anzahl aller betrachteten Datenobjekte entspricht. Der Datenpunkt  $c$  spiegelt jeweils den aktuellen Knick wider. Somit ergibt sich für  $L_c = \{2, \dots, c\}$  und  $R_c = \{c + 1, \dots, b\}$ . Iterativ werden alle möglichen Knickpunkte geprüft und die Stelle mit dem minimalen *Root Mean Squared Error* ( $RMSE_c$ ) stellt die optimale Clusteranzahl dar (siehe Formel (3.9)).  $RMSE(L_c)$  und  $RMSE(R_c)$  entsprechen den jeweiligen Fehlerquadratsummen der linken respektive rechten Gerade.

$$RMSE_c = \frac{c-1}{b-1} \times RMSE(L_c) + \frac{b-c}{b-1} \times RMSE(R_c) \quad (3.9)$$

Bei einer großen Anzahl an Datenpunkten bestimmt der Algorithmus einen zu weit rechts liegenden Knickpunkt  $c$ , so dass *Salvador und Chan* [117] empfehlen die Datenmenge iterativ zu verkleinern, indem der gefundene Knickpunkt  $c$  der ersten Iteration in der nächsten Iteration mit einem Faktor (siehe unten) multipliziert wird. Die Datenmenge wird soweit verkleinert bis in zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten derselbe Knickpunkt gefunden wird, demnach die linke und rechte Datensequenz annähernd die gleiche Größenordnung aufweisen oder die Datenmenge unter einen bestimmten Abbruchwert fällt. Das Abbruchkriterium ist nötig, damit immer eine ausreichend große Menge an Datenpunkten vorhanden ist. *Salvador und Chan* empfehlen als Multiplikationsfaktor 2 und als Abbruchkriterium 20 Datenpunkte.

Wie *Azzam* [101] S. 70 feststellte, sind sowohl die visuelle Analyse als auch die *L method* vielversprechende Ansätze eine interpretierbare Clusteranzahl zu finden. Dennoch sei erwähnt, dass es weitere Methoden zur Bestimmung der Clusteranzahl gibt. *Salvador und Chan* haben aufgezeigt, dass die *L method* im Vergleich zur *Gap Statistic*, die von *Tibshirani et al.* [122] vorgeschlagen wird, bessere Ergebnisse liefert.

Abschließend gilt es die gefundene Clusterlösung zu verifizieren. *Kaufman und Rousseeuw* [123] S. 85 schlagen sogenannte *Silhouetten* als objektives Bewertungsmaß vor. Diese lassen erkennen, ob ein Objekt zentral oder an der Grenze eines Clusters liegt. Die Berechnung der *Silhouetten*  $s(i)$  für jedes Objekt  $i$  zeigt folgende Formel.

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max \{a(i), b(i)\}} \quad (3.10)$$

Hierbei gibt  $a(i)$  die durchschnittliche Nähe zu allen anderen Objekten desselben Clusters und  $b(i)$  den minimalen Wert der durchschnittlichen Nähe zu allen Objekten der verbliebenen Cluster.  $b(i)$  spiegelt demnach die durchschnittliche Distanz zum ähnlichsten Cluster wider.  $s(i)$  kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei hohe positive Werte auf eine große Ähnlichkeit zu Objekten desselben Clusters deuten. Werte im negativen Bereich weisen hingegen darauf hin, dass das Objekt näher am Nachbarcluster liegt. Werte um Null geben an, dass das Objekt nicht eindeutig einem Cluster zuzuordnen ist.

Als weiteres Hilfsmittel kann der sogenannte *Box-Plot* (Fünf-Punkte-Zusammenfassung, Abbildung 3-7) herangezogen werden. Dieser ist eine grafische Darstellung von Daten, die sich gut zum schnellen Vergleich von mehreren Verteilungen eignet. Neben dem Median werden ebenfalls das untere und obere Quartil durch eine „Linie“ bzw. eine „Box“ dargestellt. Je kleiner der Abstand des Medians zum Rand desto schiefer ist die Verteilung. Aufschluss über die Streuung der Daten gibt der Interquartilsabstand, die Differenz zwischen oberem Quartil ( $Q_{75}$ ) und unterem Quartil ( $Q_{25}$ ), also die Länge der Box. Links und rechts an die Box anschließend folgt der „Zaun“ bis maximal zum 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Daten, die außerhalb dieses Zaunes liegen, sind potenzielle Ausreißer und bedürfen einer genaueren Betrachtung. Der Konfidenzdiamant gibt zusätzlich den Mittelwert und das obere bzw. untere Ende eines zweiseitigen 95 %-Konfidenzintervalls für den Mittelwert an. [114] S. 67

Das einleitende Flussdiagramm zu den Grundlagen der Clusteranalyse (Abbildung 3-1) weist ebenfalls eine Feedbackschleife auf. Die Clusteranalyse ist kein Prozess, der nur einmalig durchgeführt wird. Vielmehr sind zahlreiche Versuche, Wiederholungen und Wechsel von

Eigenschaften notwendig, um ein belastbares Ergebnis zu erhalten. Alle genannten Techniken zur Validierung geben nur Hinweise auf die Qualität der Cluster [109] S. 647.

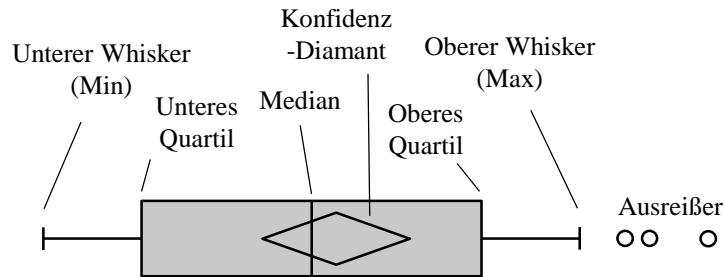


Abbildung 3-7: Box-Plot.

### 3.2.6 Stand der Wissenschaft - Modellierungstechnik Clusteranalyse

Clustertechniken werden in einer Vielzahl von Wissenschaftsbereichen verwendet. Im Folgenden wird auf ausgewählte Studien eingegangen, die im Forschungsfeld des Luftverkehrs Clusteranalysen anwenden.

*Azzam* [101] führte in seiner Dissertation eine neue, netzwerkbezogene Flughafentaxonomie ein. Auf Basis von Flugplandaten von 1979 bis 2007 wird eine Klassifizierung von Flughäfen auf Basis von netzwerktheoretischen Kennzahlen entwickelt und gegeneinander abgegrenzt. Hierdurch können spezifische Aussagen über das Entwicklungsverhalten von Flughäfen sowie deren Funktion im Luftverkehrsnetzwerk für definierte Zeitpunkte getroffen und diese in einen geografischen Kontext gestellt werden. Zur Anwendung kommt eine hierarchische Clusteranalyse. Auf Basis von sechs Netzwerkkennzahlen werden zwölf unterschiedliche Klassen als mögliche Entwicklungsstufen (unter anderem *Regionaler Flughafen*, *Interkontinentaler O&D Flughafen* und *Internationaler Mega Allround Hubflughafen*) von Flughäfen im Netzwerk ermittelt.

*Dewulf* [124] analysierte in seiner Dissertation die unterschiedlichen Strategien von Frachtfluggesellschaften, wobei sowohl Fluggesellschaften, die auf Frachtverkehr spezialisiert sind (z. B. *Cargolux* und *Volga-Dnepr Airlines*), als auch Fluggesellschaften mit kombiniertem Passagier-/Frachtverkehr betrachtet werden. Mittels einer *k-Means* Clusteranalyse klassifiziert *Dewulf* 47 Frachtfluggesellschaften auf Basis von Merkmalen der Produkt-, Markt- und Netzwerkstrategie. Die Analyse mündet in sieben Klassen von Strategien, angefangen von *Carpet Sellers* über *Premium Cargo Operators* bis hin zu *Cargo Stars*.

*Öttel et al.* [125] nutzten die Clusteranalyse um eine anwendungsorientierte Flughafenklassifizierung für Luftverkehrssimulationen zu entwickeln. Vor allem das *Single Linkage* Verfahren wird verwendet, um Ausreißer respektive Gemeinsamkeiten aus einer Gruppe von europäischen *Sekundär-Hub* Flughäfen zu finden. Weiterhin wird drauf verwiesen, dass eine Einschränkung der Auswahl der Merkmale für die jeweilige Anwendung sinnvoll ist. Je mehr Merkmale zur Charakterisierung in Betracht gezogen werden, desto weiter ist das Anwendungsfeld, aber desto kleiner werden die Stichprobe und die Repräsentativität der Ergebnisse. Im Vordergrund der Untersuchung stehen Merkmale, die die Infrastruktur bzw. Leistungsfähigkeit eines Flughafens widerspiegeln.

*Adikariwattage et al.* [126] führten in ihrer Studie eine Klassifizierung von Flughäfen ein, deren Fokus auf der Vergleichbarkeit des Passagierterminalsystems liegt. Es fließen die

Terminalgröße in Form der Anzahl an Gates und verschiedene Passagiercharakteristiken (*Domestic/International/Transfer*) von nordamerikanischen Flughäfen in die Analyse ein. Die 16 definierten Flughafenkategorien dienen als Grundlage zur Bewertung der Serviceleistung (LOS) im Zuge von Benchmarks.

*Magalhães et al.* [127] stellten die Hypothese auf, dass flexible Flughäfen weniger anfällig für ökonomische Rezessionen und äußere Veränderungen sind. Flexibel ist hierbei definiert als die Fähigkeit bzgl. der Infrastruktur so veränderbar wie möglich zu sein, sich an zukünftige Anforderungen mit minimalen Investitionen anzupassen und dabei die Produktivität mindestens beizubehalten. Hierfür betrachteten sie die Produktivitäts- und Finanzkennzahlen von 140 Flughäfen über mehrere Jahre. Die Ergebnisse zeigen, dass es keine offensichtlichen Unterschiede zwischen flexiblen und nicht-flexiblen Flughäfen gibt.

*Cosmas et al.* [128] untersuchten die Leistungsfähigkeit des US-Inlandsmarktes von 2001 bis 2010 auf Basis von *Origin and Destination* (OD) Städtepaaren. Es zeigt sich, dass Märkte mit hohem Ertrag durchweg hinter den Erwartungen zurückgeblieben sind, sowohl in Bezug auf die Passagierzahlen als auch im Umsatzwachstum. Im Vergleich dazu zeigen mittelgroße OD-Märkte ein durchschnittlich höheres Wachstum und weniger Volatilität. Für die Bewertung klassifizieren sie die OD-Märkte und implementieren sogenannte Bezugsgruppen, die einerseits auf Basis von Beobachtungen generalisieren, andererseits aber natürliche Unterschiede der Markttypen herausheben.

*Malighetti et al.* [129] analysierten die Rolle und Charakteristika verschiedener europäischer Flughafentypologien, wobei zwei verschiedenen Techniken zum Einsatz kommen. Erstens klassifizieren sie Flughäfen (467) mit Hilfe von Clustertechniken. Auf Basis von zehn Merkmalen aus den Kategorien Flughafengröße, Charakteristik der Flugziele, Vernetzungsgrad und Servicetypologie leiten *Malighetti et al.* acht Cluster ab. Zweitens wird die Methode des *Simulated Annealing* (heuristisches Approximationsverfahren) eingesetzt, um die Existenz von Subsystemen bzw. Modulen mit hoher Interkonnektivität innerhalb des europäischen Netzwerks zu identifizieren. Die Analyse mündet in 13 Modulen. Abschließend kombinieren *Malighetti et al.* beide Ergebnisse miteinander. Dabei werden Aussagen getroffen, in welchem kompetitiven Kontext die europäischen Flughäfen sich befinden und ob dieser Wettbewerb eher zwischen ähnlichen Flughäfen gleicher oder unterschiedlicher Gruppen stattfindet.

*Gelhausen* [130] entwickelte in seiner Dissertation ein allgemein anwendbares Modell zur Prognose und Analyse der Zugangsverkehrsmittel- und Flughafenwahl, welches auf eine beliebige Kombination aus Flughafenkategorien und Zugangsverkehrsmittel anwendbar ist. Die methodische Basis bilden diskrete Entscheidungsmodelle (unter anderem *Logit*- und *nested Logit*-Ansatz). Diese werden auf Basis künstlicher, neuronaler Netze und genetischer Algorithmen weiterentwickelt, so dass ein neues, diskretes Entscheidungsmodell, das *Generalized Neural Logit*-Modell, hervorgeht. Dieses bietet bezüglich der abzubildenden Präferenzkorrelationen und der funktionalen Form der Nutzenfunktion eine hohe Flexibilität. Entscheidungsrelevante Eigenschaften sind dabei die Kosten, die Fahrzeit, die Flugfrequenz und das Serviceniveau der Fluggesellschaft. Zur Bestimmung der Flughafenkategorien werden *Kohonen's Self-Organizing Maps* auf ein *Sample* deutscher Verkehrsflughäfen angewendet. Die Bildung erfolgt hierbei auf Basis des Angebotsumfangs und der Angebotsstruktur der angebotenen Flugleistungen anhand der Anzahl der Flüge pro Woche unterteilt nach Zielmarkt (innerdeutsch, europäisch, interkontinental) und Geschäftsmodell der Fluggesellschaften (*Low-Cost*, Charter, Linie). Ergebnis der Arbeit ist, dass ein neuer *Generalized Neural Logit*-Ansatz

die der Problemstellung zugrundeliegenden Zusammenhänge deutlich besser abbildet als bisherige Entscheidungsmodelle.

Tabelle 3-3 fasst die eben aufgezeigten Arbeiten und deren thematische Ausrichtung zusammen.

**Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Quellen mit Anwendung von Clustertechniken im Forschungsfeld des Luftverkehrs.**

	Untersuchungs- bereich		Cluster- verfahren		Thema
	Global	Regional	Ward	Andere Verfahren	
<i>Azzam</i> [101]	✓	×	✓	×	Globale, netzwerkbezogene Flughafentaxonomie
<i>Dewulf</i> [124]	✓	×	×	✓	Klassifizierung der Strategien von Frachtfluggesellschaften
<i>Öttel et al.</i> [125]	×	✓	×	✓	Flughafenklassifizierung für Luftverkehrssimulationen
<i>Adikariwattage et al.</i> [126]	×	✓	✓	✓	Vergleichbarkeit von Passagierterminalsystemen
<i>Magalhães et al.</i> [127]	✓	×	✓	×	Flexible Flughäfen
<i>Cosmas et al.</i> [128]	×	✓	×	✓	Leistungsfähigkeit des U.S. Inlandsmarktes
<i>Malighetti et al.</i> [129]	×	✓	✓	✓	Flughafenklassifizierung und -funktion in Europa
<i>Gelhausen</i> [130]	×	✓	×	✓	Zugangsverkehrsmittel- und Flughafenwahlmodell



### 3.3 Statistische Methoden

In diesem Kapitel werden später angewandte statistische Methoden zur Datenanalyse erläutert. Kapitel 3.3.1 geht auf wichtige Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Kapitel 3.3.2 auf Prüfverfahren von Stichprobenverteilungen und Kapitel 3.3.3 auf Zufallsexperimente ein. Verwendung finden diesen Methoden bei der generischen Modellierung von Flugplänen (Kapitel 4.5.4).

#### 3.3.1 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden zum Beschreiben einer Stichprobe herangezogen. Dieses Kapitel geht näher auf den parametrischen Aufbau und die Bestimmung des Konfidenzintervalls von verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen ein.

##### Normalverteilung [114] S. 293ff

Die Normalverteilung (NV), auch als *Gauß-Verteilung* bezeichnet, ist eine der wichtigsten, stetigen Verteilungen. Eine Zufallsvariable  $X$  mit dem Erwartungswert  $\mu$ ,  $\mu \in \mathbb{R}$  und der Varianz  $\sigma^2$ ,  $\sigma^2 > 0$  (kurz  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ) heißt normalverteilt, wenn sie die Dichte

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), x \in \mathbb{R} \quad (3.11)$$

besitzt. Für  $\mu = 0$  und  $\sigma^2 = 1$  ergibt sich die *Standardnormalverteilung*  $N(0,1)$  mit der Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right). \quad (3.12)$$

Die Verteilungsfunktion<sup>71</sup>  $F(x)$  der NV ist gegeben durch

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx. \quad (3.13)$$

##### *Schätzung des Konfidenzintervalls*

Im Allgemeinen kann zwischen einer *Punktschätzung* und einer *Intervallschätzung* unterschieden werden. Eine Punktschätzung liefert in der Regel einen Parameterschätzwert  $\hat{\theta}$ , der nicht dem wahren Wert  $\theta$ <sup>72</sup> entspricht. Um die Genauigkeit eines Schätzverfahrens direkt in die Betrachtung einzubeziehen, kann auf die Intervallschätzung zurückgegriffen werden. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist ein Intervall, das mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von  $1 - \alpha$  den wahren Wert  $\theta$  enthält. Dieses wird auch als *Konfidenz-* oder *Vertrauensintervall* bezeichnet.  $\alpha$  ist hierbei die *Irrtumswahrscheinlichkeit*, also die Wahrscheinlichkeit, dass sich der wahre Wert außerhalb des Intervalls befindet. Typische Werte für die Irrtumswahrscheinlichkeit (Fehler 1. Art) sind  $\alpha = 0,01$ ,  $\alpha = 0,05$  bzw.  $\alpha = 0,1$ . [114] S. 385f

<sup>71</sup> Der Wert an der Stelle  $x$  der Verteilungsfunktion entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass die zugehörige Zufallsvariable  $X$  höchstens den Wert  $x$  annimmt.

<sup>72</sup> Der Parameter  $\theta$  steht hier stellvertretend für einen festgelegten Kennwert. Dies kann der Erwartungswert aber ebenso die Varianz oder der Parameter einer Verteilung sein [114] S. 365.

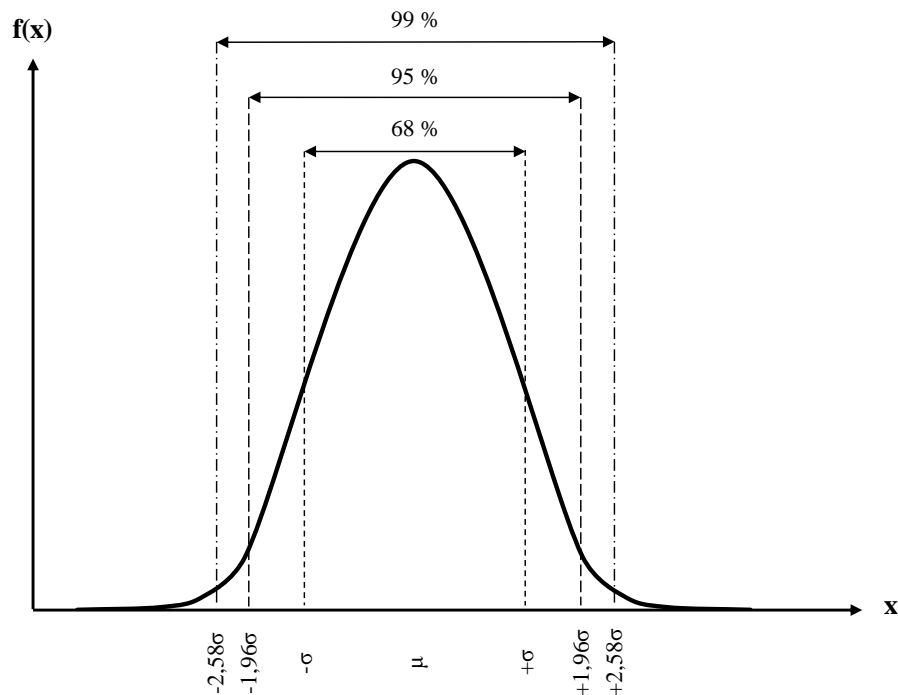


Abbildung 3-8: Dichtefunktion und Flächenanteile der NV, in Anlehnung an [131] S. 14

Zur Interpretation ist festzuhalten, dass das Verfahren der Intervallschätzung mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1 - \alpha$  zu Konfidenzintervallen führt, die den wahren Wert  $\theta$  enthalten. Daraus lässt sich aber nicht schließen, dass der Wert  $\theta$  mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1 - \alpha$  darin enthalten ist. In einem konkreten Konfidenzintervall ist  $\theta$  enthalten oder nicht. [114] S. 385f

Aufgrund der Symmetrie der Normalverteilung lässt sich ableiten, dass sich die obere und untere Intervallgrenze  $IG$  gleich, nur vorzeichenverkehrt berechnen lässt. Bei einem Konfidenzniveau von 95 %, was  $\alpha = 0,05$  entspricht, lassen sich die Intervallgrenzen nach Formel (3.14) bzw. Formel (3.15) berechnen.

$$IG_{oben} = \mu + 1,96 * \sigma \quad (3.14)$$

$$IG_{unten} = \mu - 1,96 * \sigma \quad (3.15)$$

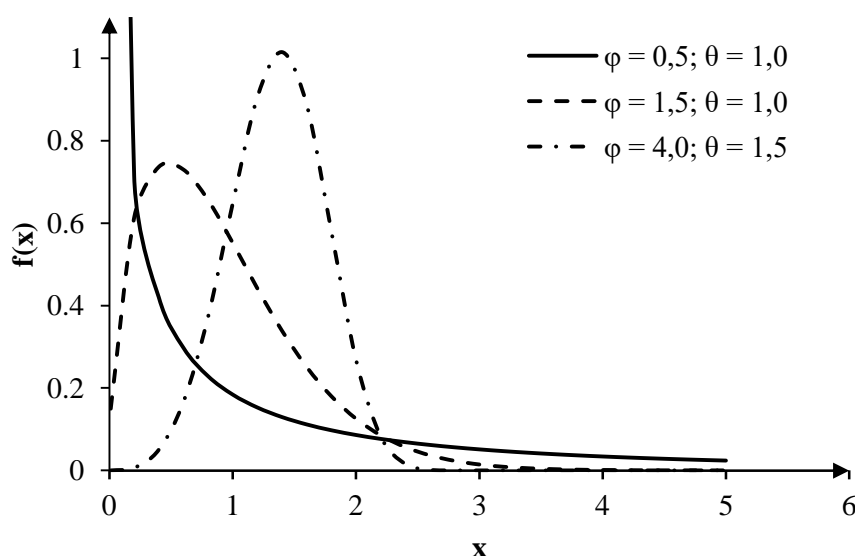
### Weibull-Verteilung [131] S. 15

Die Weibull-Verteilung ist von großer Bedeutung für die Zuverlässigkeitstheorie und in der Darstellung von Lebensdauerdiagrammen. Eine Zufallsgröße  $X$  mit den Parametern  $\varphi$  und  $\theta$  heißt Weibull-verteilt, wenn sie die Verteilungsdichte

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , falls x < 0 \\ \frac{1}{\theta^\varphi} \alpha x^{(\varphi-1)} e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\varphi} & , sonst \end{cases} \quad (3.16)$$

besitzt. Bei entsprechender Parameterwahl ( $\varphi = 1$ ;  $\lambda = \frac{1}{\theta}$ ) entsteht eine Exponentialverteilung mit dem Parameter  $\lambda$ . Abbildung 3-9 zeigt die Dichtefunktion von Weibull-Verteilungen für verschiedene Parameterwerte. Die Verteilungsfunktion ergibt sich aus

$$F(x) = \begin{cases} 0 & , falls x < 0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\varphi} & , sonst. \end{cases} \quad (3.17)$$



**Abbildung 3-9: Dichtefunktion der Weibull-Verteilung mit verschiedenen Parameterwerten, in Anlehnung an [131] S. 16**

Die Konfidenzintervallgrenzen der Weibull-Verteilung lassen sich näherungsweise mit Hilfe der Fisher-Verteilung nach Formel (3.18) bzw. Formel (3.19) berechnen. Hierbei ist  $n$  die Stichprobengröße,  $F_{(m_1, m_2, s)}$  der Wert der F-Verteilung<sup>73</sup> und  $i = 1$ <sup>74</sup>. [132]

$$IG_{i,oben} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{i}{n-i+1} F_{2i,2(n-i+1),\alpha/2}} \quad (3.18)$$

$$IG_{i,unten} = \frac{1}{\frac{n-i+1}{i} F_{2(n-i+1),2i,\alpha/2} + 1} \quad (3.19)$$

### Exponentialverteilung [131] S. 8

In der Praxis wird die Exponentialverteilung häufig zur Beschreibung von Verspätungen genutzt. Sie ist eine stetige Verteilung, die durch den Parameter  $\lambda$ , welcher für die Zahl der erwarteten Ereignisse pro Intervall steht, und die Dichte

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , falls x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} & , falls x \geq 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

definiert wird. Abbildung 3-10 stellt die Dichtefunktion von Exponentialverteilungen für verschiedene  $\lambda$  dar. Die Verteilungsfunktion ist gegeben durch:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (3.21)$$

Der Erwartungswert einer exponentialverteilten Zufallsgröße ist definiert als

$$EX = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.22)$$

<sup>73</sup> Siehe hierfür z. B. [114] S. 585.

<sup>74</sup>  $i = 1$ , da hier keine Fortpflanzung der Weibull-Verteilung betrachtet wird.

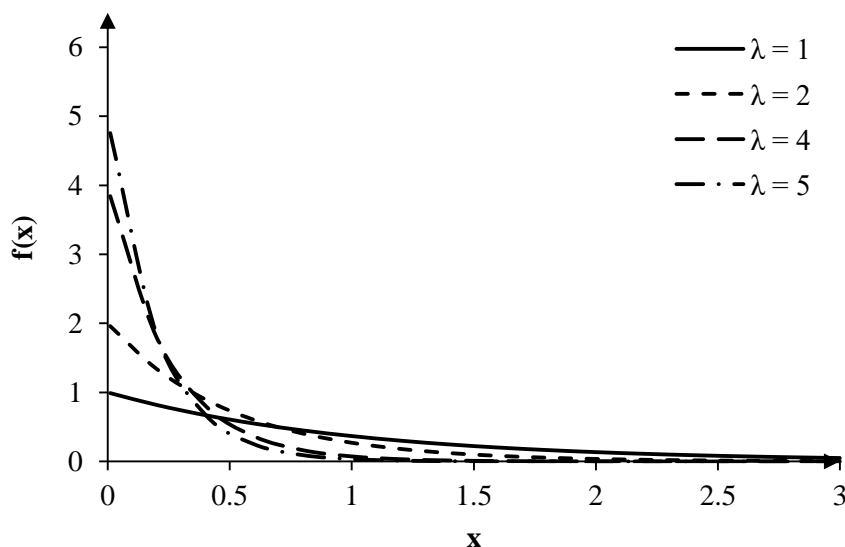


Abbildung 3-10: Dichtefunktion der Exponentialverteilung mit verschiedenen Parameterwerten, in Anlehnung an [131] S. 8

Das Konfidenzintervall des Erwartungswertes lässt sich ableiten aus dem Vertrauensbereich von  $\lambda$ , unter Verwendung der Formeln (3.23) bzw. Formel (3.24). Hierbei entspricht  $\bar{X}$  dem Mittelwert von  $X$  und  $\chi^2_{2n; \frac{\alpha}{2}}$  dem Wert der *Chi-Quadrat* Verteilung<sup>75</sup>.

$$IG_{oben} = \frac{2n\bar{X}}{\chi^2_{2n; \frac{\alpha}{2}}} \quad (3.23)$$

$$IG_{unten} = \frac{2n\bar{X}}{\chi^2_{2n; 1 - \frac{\alpha}{2}}} \quad (3.24)$$

### Poisson-Verteilung [131] S. 6

Die *Poisson*-Verteilung besitzt in der Verkehrsströmungslehre eine wichtige Bedeutung, da ein ungestörter bzw. fahrplanloser Verkehr durch eine *Poisson*-Verteilung beschrieben werden kann. Die Anzahl der pro Zeitintervall ankommenden Passagiere am Flughafen oder die Anzahl der pro Zeitintervall gezählten Fahrzeuge an einem Straßenquerschnitt bei ungestörtem Verkehrsfluss ist beispielsweise *Poisson*-verteilt.

Die *Poisson*-Verteilung  $P(k)$  ist eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung mit

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (3.25)$$

Der Erwartungswert und ebenfalls die Varianz werden durch den Parameter  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) beschrieben. Die Verteilungsfunktion ist gegeben durch:

$$F_{\lambda}(n) = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{k!}. \quad (3.26)$$

<sup>75</sup> Siehe hierfür z. B. [114] S. 583.

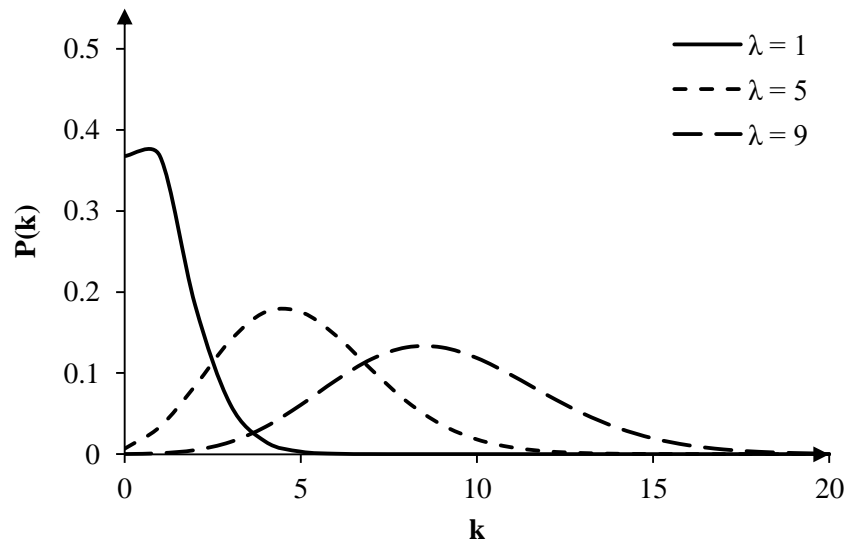


Abbildung 3-11: Dichtefunktion der Poisson-Verteilung mit verschiedenen Parameterwerten.

Für kleine  $\lambda$ -Werte nimmt die *Poisson*-Verteilung eine stark rechtsschiefe Form an. Mit größer werdenden  $\lambda$ -Werten wird  $P(k)$  symmetrischer und nähert sich der Normalverteilung an (siehe Abbildung 3-11).

Die in diesem Kapitel genannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden in Kapitel 4.5.4.2 zur Modellierung von Wochenganglinien der Flugbewegungen genutzt um generische Flugpläne für Flughafenklassen (Kapitel 4.5) zu bestimmen.

### 3.3.2 Statistische Testverfahren

#### 3.3.2.1 Statistische Hypothesen und Testentscheidungen

Statistische Hypothesen sind Behauptungen über Eigenschaften von Zufallsvariablen, die in der Regel nur indirekt überprüfbar sind. Das heißt, die *Arbeitshypothese* ( $H_A$ ) kann nie direkt bestätigt werden. Somit wird eine *Gegen- oder Nullhypothese* (*Nicht- $H_A$*  oder  $H_0$ ) aufgestellt und versucht, diese zu widerlegen.

Solche Hypothesen werden in der Regel anhand einer (unabhängigen) Stichprobe mit Hilfe von statistischen Tests (siehe Kapitel 3.3.2.2) überprüft, das heißt, auf Basis der berechneten Prüfgröße entweder angenommen oder verworfen. Wird eine Entscheidung getroffen (annehmen oder verwerfen der Nullhypothese), kann diese Entscheidung richtig sein. Jedoch kann die Nullhypothese auch verworfen werden, obwohl diese theoretisch richtig ist. Das bedeutet, sie wird fälschlicherweise verworfen und der *Fehler 1. Art* oder  $\alpha$ -Fehler wird begangen. Dieser wird oft als Signifikanzniveau bzw. (nur)  $\alpha$  bezeichnet und in der Regel wird  $\alpha = 0,05$  oder  $\alpha = 0,01$  gewählt. Im Gegensatz dazu kann die Nullhypothese auch nicht verworfen werden, obwohl diese eigentlich falsch ist. Dieses fälschlicherweise Annehmen der Nullhypothese wird auch *Fehler 2. Art* oder  $\beta$ -Fehler genannt<sup>76</sup>. Beide Fehlerarten hängen voneinander ab. Je kleiner  $\alpha$  gewählt wird, desto größer ist  $\beta$ , das heißt, die Nullhypothese wird seltener fälschlicherweise abgelehnt (Fehler 1. Art), jedoch umso häufiger fälschlicherweise

<sup>76</sup> Der  $\alpha$ -Fehler kann auch als „falscher Alarm“ und der  $\beta$ -Fehler als „versäumter Alarm“ umschrieben werden.

**Tabelle 3-4: Mögliche Entscheidungssituationen bei statistischen Testverfahren, in Anlehnung an [133] S. 380, [132] S. 308.**

Entscheidung \ Wirklichkeit	$H_0$ wahr	$H_0$ falsch
$H_0$ verworfen ( $H_A$ angenommen)	Fehler 1. Art ( $\alpha$ -Fehler)	richtige Entscheidung ( $1 - \beta$ )
$H_0$ annehmen ( $H_A$ verworfen)	richtige Entscheidung ( $1 - \alpha$ )	Fehler 2. Art ( $\beta$ -Fehler)

beibehalten (Fehler 2. Art). Die Wahrscheinlichkeit ( $1 - \beta$ ) wird als (*Statistical*) *Power* oder *Teststärke* bezeichnet. Tabelle 3-4 fasst die möglichen Entscheidungssituationen zusammen. [132] S. 307 ff

Diese Fehlerarten entstehen dadurch, dass Hypothesen stets auf Basis einer Stichprobe der Grundgesamtheit überprüft werden, was in der Regel zu Abweichungen und Unterschieden führt [133] S. 379. Eine völlige Vermeidung beider Fehler würde eine Ausschaltung der Zufallswirkung bedeuten. Daraus folgt, dass nicht nur eine Stichprobe, sondern das Ganze betrachtet werden müsste, was in vielen Fällen nicht möglich ist [132] S. 308.

Mit statistischen Testverfahren sind „kaum falsche“ Nullhypothesen nicht zu erkennen. Somit wird in der Regel angenommen, dass die Nullhypothese entweder „richtig“ oder „deutlich falsch“ ist. Die Testentscheidung, die Nullhypothese anzunehmen, bedeutet demnach nicht, dass diese wahrscheinlich richtig ist, sondern richtig sein könnte. Die Nullhypothese beizubehalten ist also eine „schwache“ Aussage. Es lässt sich keine Aussage über deren Gültigkeit erschließen, solange  $\beta$  unbekannt ist. Die Nullhypothese zu verwerfen, ist hingegen eine „starke“ Aussage und es kann davon ausgegangen werden, dass die Arbeitshypothese wahrscheinlich richtig ist. [132] S. 309

Zur Auswertung statistischer Testverfahren wird üblicherweise der *P-Wert*<sup>77</sup> nach R.A. Fisher, auch als *Überschreitungswahrscheinlichkeit* oder *empirisches Signifikanzniveau* bezeichnet, verwendet. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit an durch Zufall eine mindestens genauso große Prüfgröße wie die aus den Daten berechnete zu erhalten, wenn die Nullhypothese in Wirklichkeit wahr ist. Je kleiner der P-Wert, desto mehr spricht das Ergebnis gegen die aufgestellte Nullhypothese. Ein  $P > 0,05$  wird im Allgemeinen als statistisch nicht signifikant bezeichnet.

Statistisch signifikante Befunde, also P-Werte unter 5 %, werden mit einer dreistufigen Sternsymbolik gekennzeichnet, die die Grenzen angibt, zwischen denen der P-Wert liegt. [132] S. 323

$$[*] 0,05 \geq P > 0,01$$

$$[**] 0,01 \geq P > 0,001$$

$$[***] P \leq 0,001$$

### 3.3.2.2 Chi-Quadrat ( $\chi^2$ ) Anpassungstest<sup>78</sup>

Zur Überprüfung ob eine Stichprobe aus einer Grundgesamtheit durch eine bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F(x)$ <sup>79</sup> bestimmt werden kann respektive entsprechend verteilt ist,

<sup>77</sup> Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem vor dem Test festgelegten Signifikanzniveau  $\alpha$  (Irrtumswahrscheinlichkeit).

<sup>78</sup> In Anlehnung an [131] S. 20.

werden Anpassungstests (*Goodness-of-fit Tests*) herangezogen. Im Folgenden soll hier exemplarisch auf den  $\chi^2$ -Anpassungstest<sup>80</sup> näher eingegangen werden, da dieser in Kapitel 4.5.4 zur Anwendung kommt.

Es gilt, die folgende Nullhypothese  $H_0$  zu überprüfen:

$H_0$ : „Die Stichprobe entstammt einer Grundgesamtheit mit der Verteilungsfunktion  $F(x)$ “.

Der  $\chi^2$ -Test basiert auf dem Vergleich von empirischen und theoretischen Klassenhäufigkeiten. Dazu wird die erhobene Stichprobe in Klassen (1 ...  $Kz$ ) eingeteilt. Mit Ausnahme der linken und rechten Randklasse sollten alle Klassen die gleiche Breite besitzen. Folgende Regeln sollten bei der Klassenbildung beachtet werden:

$$Kz \leq 5 \lg(n) \text{ oder } Kz \approx \sqrt{n} \quad (3.27)$$

$$Kb = \frac{R}{1 + 3,32 \lg(n)} \quad (3.28)$$

$$6 \leq Kz \leq 20 \quad (3.29)$$

wobei

$Kz$ : Klassenzahl

$Kb$ : Klassenbreite

$n$ : Stichprobenumfang

$R$ : Range/Spannweite der empirischen Daten =  $x_{max} - x_{min}$

Des Weiteren wurde empirisch festgestellt, dass der  $\chi^2$ -Test am besten funktioniert, wenn die Klassenbreite größer gleich fünf ist<sup>81</sup>. Um dies zu erreichen, müssen ggf. Klassen zusammengefasst werden [134] S. 308, [135] S. 206. Für jede Klasse wird die theoretische Klassenhäufigkeit  $h_j$  berechnet, mit der Werte innerhalb einer Klasse aufgrund der zunächst angenommenen Verteilung  $F(x)$  erwartet werden. Die beobachteten Klassenhäufigkeiten der Stichprobe werden mit  $f_j$  bezeichnet. Folglich kann die *Testgröße* des Anpassungsverfahrens  $\chi^2_{ber}$  mit der Formel

$$\chi^2_{ber} = \sum_{j=1}^{Kz} \frac{(f_j - h_j)^2}{h_j} \quad (3.30)$$

berechnet werden. Bei hinreichend großem Stichprobenumfang ist die *Prüfgröße*  $\chi^2$ -verteilt mit  $Kz - 1 - m$  Freiheitsgraden, wobei  $m$  der Anzahl der aus der Stichprobe geschätzten Parameter (siehe Kapitel 3.3.1), die in die theoretisch angenommene Verteilung einfließen, entspricht. Die Prüfgröße leitet sich aus dem entsprechenden  $\alpha$ -Quantil der  $\chi^2$ -Verteilung ab ( $\chi^2_{Kz-1-m, 1-\alpha}$ ). Die entsprechenden Werte sind in Abhängigkeit des Freiheitsgrades und des Signifikanzniveaus

<sup>79</sup> Wichtigste Vertreter werden in Kapitel 3.3.1 genannt.

<sup>80</sup> Ein weiteres Beispiel ist der *Kolmogorov-Smirnov* Anpassungstest, siehe [134] S. 311 ff, [132] S. 337 ff.

<sup>81</sup> Die Klassenbreite sollte nie unter 1 liegen [132] S. 333.

normierten Tafeln zu entnehmen<sup>82</sup>. Die Nullhypothese wird mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  abgelehnt, wenn gilt

$$\chi_{ber}^2 \geq \chi_{KZ-1-m,1-\alpha}^2 \quad (3.31)$$

und entsprechend angenommen, wenn gilt

$$\chi_{ber}^2 < \chi_{KZ-1-m,1-\alpha}^2 \quad (3.32)$$

Auf Basis der Formeln (3.31) bzw. Formel (3.32) wird eine Entscheidung für oder gegen die Nullhypothese getroffen.

Zu beachten ist, dass Anpassungstests für mittlere Stichprobengrößen am geeignetsten sind. Bei großen Stichprobenumfängen führt der Test oft zur Ablehnung der Verteilungshypothese, da winzige Unterschiede entdeckt werden, die in der Praxis aber eher zufällig sind. Im umgekehrten Fall wird die Hypothese bei kleinen Stichprobenumfängen oft angenommen. Dabei werden aber große, für die Praxis bedeutsame Unterschiede nicht entdeckt. Ein großer Nachteil ist, falls der Test zur Ablehnung der Nullhypothese führt, dass es keine Schlussfolgerung gibt, welche Verteilungsfunktion besser geeignet sein könnte [134] S. 308.

Die statistischen Hypothesen und der *Chi-Quadrat* Anpassungstest werden ebenfalls in Kapitel 4.5.4.2 zur Modellierung von Wochenganglinien der Flugbewegungen genutzt um generische Flugpläne für Flughafenklassen (Kapitel 4.5) zu bestimmen.

### 3.3.3 Urnenmodell

Das Urnenmodell, das in Kapitel 4.5.4.3 zur Entwicklung generischer Flugpläne Anwendung findet, ist eine Methode der Kombinatorik zur Ziehung einer Zufallsstichprobe  $n$  aus einer endlichen Grundgesamtheit  $G = \{1, \dots, N\}$ . Jede Einheit der Grundgesamtheit entspricht einer Kugel  $E_i, i = 1 \dots N$ , die sich gedanklich in einer Urne befindet.

Die gezogenen Kugeln, das heißt das geordnete Tupel  $(E_1, \dots, E_n)$ , wird als Stichprobe vom Umfang  $n$  bezeichnet. Eine Ziehung, bei der alle möglichen Stichproben gleich wahrscheinlich sind, ist eine einfache Zufallsstichprobe. Es wird zwischen verschiedenen Ziehungsverfahren differenziert, wobei ausschließlich eine Ziehung ohne Zurücklegen und ohne Beachtung der Reihenfolge später angewendet wird.

Wenngleich die Wahrscheinlichkeit des Ziehens jeder einzelnen Kugel gleich ist, so ändert sich die Wahrscheinlichkeit aufgrund von Klassifizierungen der Einheiten (z. B. verschiedene Farben), eine Kugel einer speziellen Zugehörigkeit (z. B. eine blaue Kugel) zu ziehen. Zur mathematischen Beschreibung kann hierfür die *Laplace*-Formel (3.33) verwendet werden. Bei endlich vielen Ergebnissen eines Zufallsexperiments, die alle mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten können, ist die Wahrscheinlichkeit  $P(A)$  des Ereignisses  $A$  der Quotient aus der Menge der Ergebnisse, bei dem Ereignis  $A$  eintritt und der Menge aller möglichen Ergebnisse. [114] S. 188

$$P(A) = \frac{\{A\}}{\{\Omega\}} \quad (3.33)$$

---

<sup>82</sup> Siehe hierfür z. B. [114] S. 583.



### 3.4 Prognosen zur Entwicklung von Flughafenmerkmalen

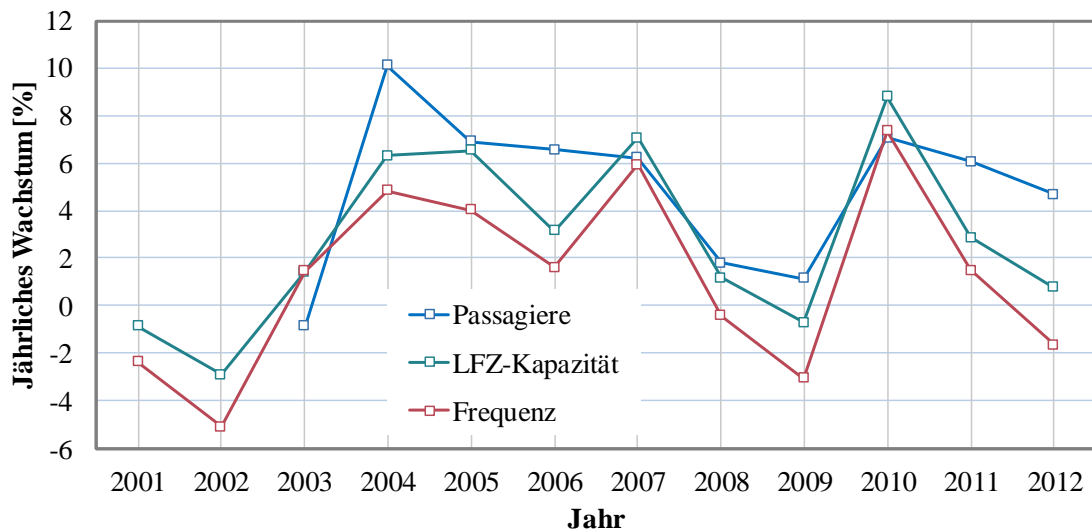


Abbildung 3-12: Jährliches, globales Wachstum [%] des Passagiervolumens, der LFZ-Kapazität und der Flugfrequenz, 2001 - 2012, Datenbasis: [7], nur Scheduled Flights<sup>83</sup>.

Der Luftverkehr ist ein Wachstumsmarkt. Seit 1984 hat sich der Verkehr, gemessen in *Revenue Passenger Kilometer* (RPK), alle 15 Jahre verdoppelt und Marktstudien prognostizieren, dass dieser Trend auch in den kommenden Dekaden anhält. Auf 4,4 % pro Jahr wird das durchschnittliche, weltweite Wachstum des Luftverkehrs bis 2036 geschätzt [136] S. 22.

Abbildung 3-12 zeigt die jährliche Entwicklung ausgewählter Kennzahlen des Luftverkehrsmarktes auf globalem Level von 2001 - 2012. Deutlich zu erkennen sind die Folgen der Terroranschläge des 11. Septembers 2001 und der Finanzkrise 2008/2009, die einen Rückgang des globalen Luftverkehrs verursachten. Über den gesamten Zeitraum entwickelte sich der Luftverkehrsmarkt jedoch positiv. Das Passagiervolumen stieg um 4,9 % pro Jahr, die LFZ-Kapazität (Summe der angebotenen LFZ-Sitze) um 3,7 % pro Jahr und die Flugfrequenzen um 2,1 % pro Jahr. Auch der Sitzladefaktor (SLF, nicht dargestellt) nahm um 1,3 % pro Jahr zu.

In den folgenden Kapiteln wird näher darauf eingegangen, wie sich bestimmte Merkmale des Luftverkehrs prognostizieren lassen, um Aussagen treffen zu können, wie sich die modellierten Flughafenklassen zukünftig entwickeln. In diesem Kontext wird der Fokus auf der Entwicklung der Verkehrskennzahlen liegen, die maßgeblich Einfluss auf den Flugplan nehmen. Die verwendeten Prognosemethoden finden Anwendung in Kapitel 4.5.4.4.

#### 3.4.1 Passagier- und Verkehrsnachfrage

Die Entwicklung der Passagiernachfrage hängt von zahlreichen Faktoren ab. Einer der entscheidendsten Treiber ist die ökonomische Entwicklung, gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP)<sup>84</sup>. Sinkende Flugpreise hingegen sind nur teilweise der Grund für ein Passagierwachstum, da diese den Verkehr größtenteils nur zwischen Fluggesellschaften und Märkten verlagern,

<sup>83</sup> *Scheduled Flights* sind Flüge, die von der Fluggesellschaft im Vorhinein geplant und in den Flugplan aufgenommen werden. Falls diese aufgrund kurzfristig eintretender Ereignisse verschoben oder gestrichen werden, ist dies hier nicht berücksichtigt.

<sup>84</sup> Die durchschnittliche Einkommenselastizität betrug 1,4 (1988 - 2008), [137] S. 32.

anstatt das Gesamtverkehrsvolumen zu erhöhen [137] S. 32. Jedoch sind in der Literatur auch Quellen zu finden, die mit dem raschen Wachstum der LCC auch einen Anstieg der Nachfrage implizieren [138]. Weiterhin ist die demografische Entwicklung von Bedeutung. Hierzu zählt unter anderem das Einwohnerwachstum, die Urbanisierung sowie die Entwicklung der Mittelschicht, vor allem in Entwicklungsländern. Aber auch politische Ereignisse oder die allgemeine Sicherheitslage beeinflussen die Nachfrage der Passagiere. Aufgrund der gestiegenen Terrorgefahr (unter anderem in der Türkei und in Nordafrika) verlagert sich der Markt für touristische Flugreisen, da Urlauber ihre Reisen zunehmend auf den Heimatmarkt beschränken [139].

Die beiden großen LFZ-Hersteller *Airbus* und *Boeing* veröffentlichen jedes Jahr Prognosen über die langfristige Entwicklung des Luftverkehrsmarktes [136], [140]. Hierauf kann ebenfalls aufgebaut werden, so dass nicht alle Entwicklungen der Merkmale eigenständig prognostiziert werden müssen. Des Weiteren kann auf Basis von Daten einer bestimmten Zeitreihe (z. B. jährliches Passagieraufkommen) eine (Trend-) *Extrapolation* durchgeführt werden. Das heißt, es werden Datenpunkte in Zeitbereichen abgeschätzt, wo keine bekannten Daten vorhanden sind (z. B. für zukünftige Jahre). Die Gültigkeit der Ergebnisse hängt vom gewählten Modell ab. Jedoch gilt, dass die extrapolierten Werte unzuverlässiger werden, desto weiter man sich von den bekannten Daten entfernt.

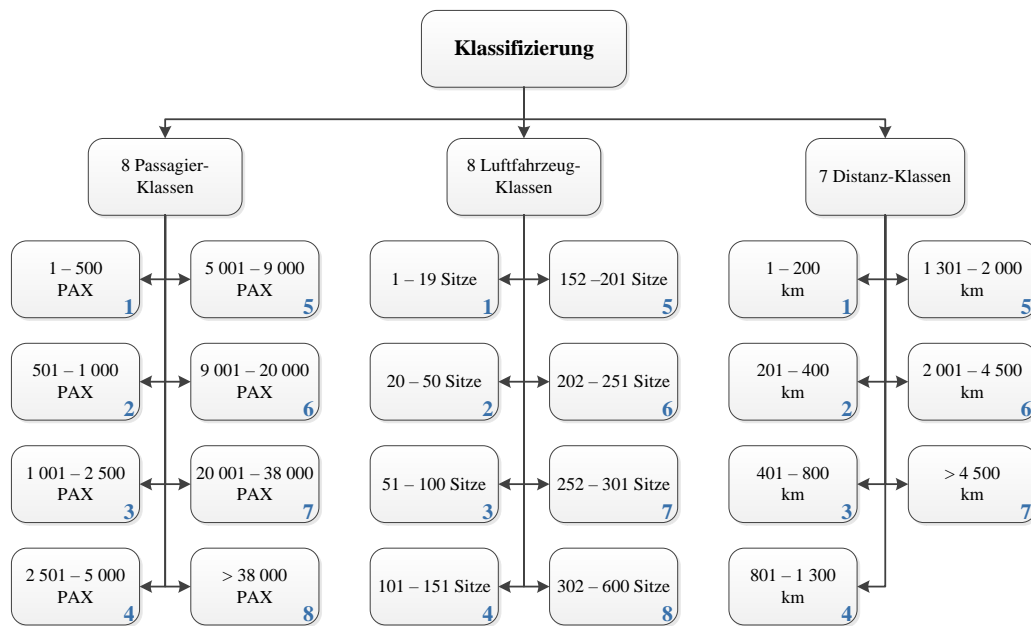
Im folgenden Kapitel wird näher darauf eingegangen, inwieweit eine Steigerung des Passagiervolumens auch eine Frequenzsteigerung zur Folge hat.

### 3.4.2 Frequenz und Kapazität von Flugbewegungen

Das *Forecast of Aircraft Movements*-Modell (FoAM) des *DLR-Lufttransportsysteme* dient dazu, das Verhalten einer Fluggesellschaft in Bezug auf die Steigerung der LFZ-Kapazität (Summe der angebotenen LFZ-Sitze) auf einem Flugsegment zu modellieren [141, 142]. Insbesondere soll die Abwägung verstanden werden, ob eine Steigerung des Passagiervolumens mit einer Frequenzsteigerung oder aber der Vergrößerung des eingesetzten LFZ einhergeht. Eine unterschiedliche Anzahl an Flugbewegung ist die Folge. Ziel von FoAM ist es, den typischen Verkehrsmix und das Wachstum der Flugfrequenzen auf Basis eines angenommenen Passagierwachstums pro Jahr für einen zukünftigen Zeitpunkt zu prognostizieren.

Das FoAM-Modell beruht auf der Annahme, dass Frequenz und LFZ-Größe von zwei zentralen Einflussfaktoren abhängen. Diese sind einerseits das Passagiervolumen auf der Strecke und andererseits die Länge der Strecke. Es wird erwartet: Je größer die Passagiernachfrage auf einer Strecke und je länger die Strecke, desto größer die eingesetzten Flugzeuge. Dazu werden drei Klassen definiert, denen zunächst alle weltweiten Flüge (Segmente) zugeordnet werden: die zurückgelegte Distanz, die Sitzplatzkapazität des eingesetzten Flugzeugs und das Passagiervolumen pro Monat. Pro Klasse gibt es acht bzw. sieben Unterklassen (vgl. Abbildung 3-13).

Ein Segment kann also einer von 448 Klassenkombinationen zugeordnet werden. Wenn zwischen zwei Flughäfen zwei oder mehrere verschiedene Flugzeuge eingesetzt werden, so erfolgt ebenso eine Zuordnung zu mehreren Klassenkombinationen.



**Abbildung 3-13: Klassifizierung der Segmente innerhalb des FoAM-Modells nach Passagiervolumen pro Monat, Sitzplatzkapazität des Luftfahrzeugs und zurückgelegter Distanz.**

*Beispiel:*

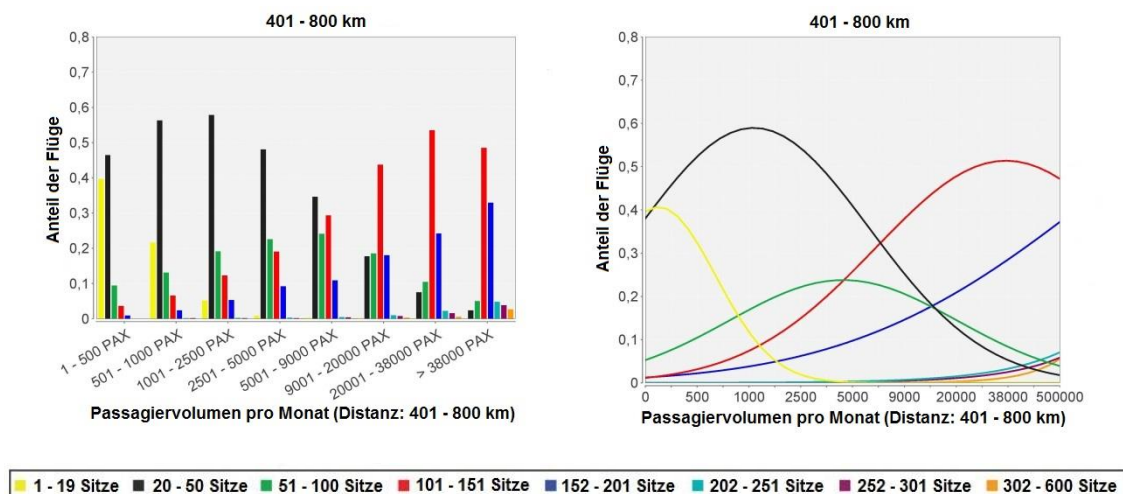
*Im Februar 2014 flogen auf der Strecke Hamburg - London 50 Airbus A320 mit 168 Sitzen und 40 Boeing 737 mit 120 Sitzen, wobei alle Fluggesellschaften gemeinsam betrachtet werden. Insgesamt wurden in dem Monat 13 000 Passagiere (PAX) befördert. Dieses Segment wird demnach sowohl der Klassenkombination von 4 500 - 30 000 PAX/151 - 201 Sitzen/400 - 800 km als auch 4 500 - 30 000 PAX/100 - 151 Sitzen/400 - 800 km zugeordnet. Dabei werden der ersten Klasse 50 und der zweiten Klasse 40 Abflüge zugeordnet.*

Der Algorithmus bestimmt schließlich empirisch den typischen LFZ-Mix<sup>85</sup>  $\alpha$  (*Proportion of Flights*) für jede einzelne Passagier-/Distanz-Klasse Kombination, grafisch dargestellt links in Abbildung 3-14 für die Distanz-Klasse 401 - 800 km. Diese diskreten Zahlen werden mittels Regressionsfunktionen<sup>86</sup> approximiert, um einen LFZ-Mix für alle möglichen Passagiervolumina pro Monat zu erhalten (Abbildung 3-14, rechts).

Zu erkennen ist, dass der Anteil einer LFZ-Klasse ein Maximum bei einem bestimmten Passagiervolumen erreicht. Verändert sich das Passagiervolumen, sinkt der Anteil dieser LFZ-Klasse. Nachdem der LFZ-Mix  $\varepsilon$  abgeleitet wurde, kann die Frequenz pro Segment ermittelt werden, indem das Gesamtpassagiervolumen ( $PAX$ ) durch die durchschnittliche Anzahl der Passagiere pro Flug ( $\emptyset PAX \text{ pro Flug}$ ) geteilt wird (siehe Formel (3.34)).

<sup>85</sup> Anmerkung: Strategische Entscheidungen einer Airline LFZ-Größen einzusetzen, um mit Wettbewerbern auf einem bestimmten Segment zu konkurrieren, werden nicht explizit betrachtet. Aufgrund des Stichprobenumfangs ist aber mit keinem größeren Einfluss zu rechnen.

<sup>86</sup> Die Regressionsfunktionen folgen einer Gauß-Funktion (siehe Kapitel 3.3.1).



**Abbildung 3-14: Diskrete (links) und kontinuierliche Verteilung (rechts) der LFZ-Größen (Verkehrsmix), Distanz-Klasse: 401 - 800 km, in Anlehnung an [141, 142].**

Der Nenner ist dabei die gewichtete Summe über alle LFZ-Klassen des Produkts aus Sitzladefaktor<sup>87</sup> ( $SLF_{DIST}$ ) und der durchschnittlichen Sitzplatzkapazität ( $\emptyset \text{ Sitze}_{AC}$ ).

$$\text{Frequenz pro Segment} = \frac{PAX}{\emptyset PAX \text{ pro Flug}} = \frac{PAX}{\sum_{AC} \varepsilon_{AC} * SLF_{DIST} * \emptyset \text{ Sitze}_{AC}} \quad (3.34)$$

Die weltweite Anzahl an Flugbewegungen ergibt sich aus der Summe der Frequenzen aller Segmente. Schließlich lassen sich zukünftige Frequenzen unter Annahme eines Passagierwachstums pro Segment (z. B. 4,7 % pro Jahr) und eines SLF-Wachstums (z. B. 0,77 %<sup>88</sup>) berechnen, so dass auch das globale Wachstum an Flugbewegungen bis 2030 mit 3,0 % pro Jahr prognostiziert wird.

### 3.5 Verfügbarkeit und Qualität der Daten

Wie eingangs der Arbeit erwähnt, ist eine der größten Herausforderungen (vor allem in der Wissenschaft) die eingeschränkte Datenverfügbarkeit und -qualität. Vor allem in Bezug auf betriebswirtschaftliche Kennzahlen (Kosten, Erlöse) sind nur wenige Daten verfügbar<sup>89</sup>. Zwar sind viele Fluggesellschaften und weitere Beteiligte verpflichtet, jährlich einen Geschäftsbericht zu veröffentlichen, jedoch sind dort oft nur aggregierte Kostenpositionen verzeichnet. Für eine quantitative Bewertung, insbesondere im Bereich der Kostenmodellierung von verschiedenen Fluggesellschaftstypen (siehe [143]), sind diese Daten essentiell. Im Folgenden werden die primären Datenquellen, die für diese Arbeit zur Verfügung standen, vorgestellt und erläutert.

<sup>87</sup> In Abhängigkeit von der Distanz-Klasse.

<sup>88</sup> Empirisch ermitteltes, durchschnittliches SLF-Wachstum pro Jahr von 2003 - 2012 über alle LFZ-Klassen.

<sup>89</sup> Dieser Umstand ist verständlich, da kein kommerziell agierendes Unternehmen freiwillig Kosten und Erlöse preisgibt und somit Einzelheiten seines Geschäftsmodells offenbart.

### Sabre Market Intelligence (MI)

*Sabre MI*, eine Online-Softwarelösung der *Sabre Airline Solutions*, bietet einen kostenpflichtigen Zugang zu globalen Passagierdaten und Flugplaninformationen. Die Daten reichen bis ins Jahr 2002 zurück. Primäre Datenquelle sind Buchungen über *Global Distribution Systems* (GDS), aber auch Fluggesellschafts-interne und andere externe Datenquellen. Erweitert werden diese Daten durch Algorithmen, die Direktbuchungen bei Fluggesellschaften und Charterflüge abschätzen. Somit wird ein kompletter Überblick über Flugplan- und Verkehrsdaten geliefert. [7]

Für die Klassifizierung der Flughäfen wurden aus der *Sabre MI* Datenbank die Flugbewegungen pro Flughafen extrahiert, wobei LFZ-Typ und die operierende Fluggesellschaft pro Flugbewegung von Interesse sind. Somit kann der *Verkehrsmix* und der *Flugbewegungsanteil pro Fluggesellschaftsklasse* (vgl. Kapitel 4.3.6) ermittelt werden. In Bezug auf die Klassifizierung von Fluggesellschaften ist die Grundlage aller Merkmale, die unter die Kategorie Markt fallen (vgl. Tabelle 4-6, S. 84), die *Sabre MI* Datenbank. Des Weiteren sind auch die Erlöse der Fluggesellschaften dieser Datenbank entnommen.

### Air Transport Research Society (ATRS) Global Airport Benchmarking Report

Dieser kostenpflichtige Bericht misst und vergleicht die Leistung wichtiger Aspekte des Flughafenbetriebs, unter anderem Produktivität, Effizienz, Stückkosten, finanzielle Ergebnisse und Flughafengebühren. Der Bericht von 2014 enthält Daten von 200 Flughäfen und 26 Flughafengruppen verschiedener Größen, gelegen in Asien, Europa und Nordamerika aus dem Jahr 2012. Das heißt, die Daten werden immer mit einem zeitlichen Verzug von ca. 1,5 Jahren veröffentlicht. Weiterhin sind keine südamerikanischen oder afrikanischen Flughäfen enthalten. [144]

Die Daten bezüglich der *Passagiere*, der *Flugbewegungen*, der *Fracht*, der *Arbeitseinheit*, der *Arbeitseinheit pro Arbeiter*, der *Flugbewegungen pro SLB*, der *Erlöse* und *Kosten*, der *Terminalgröße* sowie der *Passagier- und Terminalentgelte* von Flughäfen wurden dem *ATRS Global Airport Benchmarking Report* für diese Arbeit entnommen (siehe Tabelle 4-2, S. 64). Über diesen Datensatz hinaus wurden v.a. für das globale LTS bedeutende, südamerikanische und afrikanische Flughäfen ergänzt und Daten mittels öffentlich zugänglicher Statistiken erhoben. Infrastrukturmerkmale wie z. B. *Anzahl der SLB*, *maximale Länge/Breite der SLB* und *Anzahl der Gates* (siehe Tabelle 4-2, S. 64) wurden auf Basis von [145] ergänzt.

### ICAO Data+

Die ICAO bietet ebenfalls Luftverkehrsdaten auf Basis ihrer 191 Mitgliedsstaaten in der Online-Softwarelösung *Data+* an. Die kostenpflichtige Datenbank umfasst unter anderem Daten zu Finanzen, Personal und der Flotte von Luftverkehrsgesellschaften sowie Verkehren an Flughäfen und auf Flugstrecken. Herauszuheben ist, dass Daten über *Flugstunden* und *Frachtvolumina* (vgl. Kategorie *Größe* in Tabelle 4-6, S. 84) einzelner Fluggesellschaften verfügbar sind, die in diese Arbeit einfließen. Weiterhin sind alle Daten, die unter die Kategorie Flotte bezüglich der Fluggesellschaften fallen (siehe Tabelle 4-6, S. 84), der *ICAO Data+* Datenbank entnommen.

Die Nutzung solchen Datenbanken erleichtert das Zusammenstellen von Daten. Jedoch treten nicht selten Datenlücken auf, da nicht alle Werte erhoben werden konnten. Um auf das Beispiel mit den betriebswirtschaftlichen Kennzahlen zurückzukommen: Der *ATRS Global Airport*

*Benchmarking Report 2014* [146] weist unter anderem einen Wert für *Non-Aeronautical Revenue* aus. Dieser ist aber für 23 der 200 Flughäfen nicht aufgeführt. Beim *Concession Revenue* sind sogar die Werte für 73 der 200 Flughäfen nicht aufgelistet. Ein weiteres Beispiel kann für die *Sabre MI* Daten angeführt werden. Diese zeigen im Jahr 2014 für die Flotte der Fluggesellschaft *Norwegian* 41,5 Mrd. *Available Seat Kilometer* (ASK) auf. Der Geschäftsbericht hingegen weist 46,4 Mrd. ASK aus [147], ein Unterschied von über 10 %. Ebenfalls großen Einfluss haben die zur Berechnung der ASK verwendete Bestuhlung der einzelnen LFZ und die Bestimmungsweise der OD-Distanz (Großkreisentfernung, etc.).

In der Regel ist der Zugang zu qualitativ hochwertigen Daten nicht gegeben bzw. mit hohen Kosten verbunden. Darauf zurückzuführen ist auch die Verwendung von nicht aktuellen Daten in dieser Arbeit in Bezug auf die Modellierung von Flughäfen und Fluggesellschaften.

## 4 Modellierung generischer Flughäfen und flughafennaher Elemente

Nachdem in Kapitel 3 die grundlegenden Techniken vorgestellt wurden, befasst sich dieses Kapitel mit der Modellierung von generischen Flughäfen im Kontext des LTS sowie weiterer flughafennaher Elemente.

Einleitend wird in Kapitel 4.1 auf die Vorgehensweise eingegangen, wie die Flughafenrepräsentanten in Anlehnung an das Prinzip des V-Modells modelliert werden. Kapitel 4.2 geht anschließend detailliert auf die Schritte zur Modellierung und Definition von Flughafenklassen ein, wobei infrastrukturelle, betriebliche und wirtschaftliche Merkmale (siehe auch Kapitel 2) Berücksichtigung finden. Jedoch reicht es nicht aus, die Flughäfen separiert zu betrachten. Deswegen befasst sich Kapitel 4.3 mit den Fluggesellschaften. Sie beeinflussen maßgeblich das operative und wirtschaftliche Ergebnis (Kapitel 4.4) der Flughäfen und bilden die wichtigste Kundengruppe der Flughäfen. Die Modellierung erfolgt mit der gleichen Methodik und es werden Fluggesellschaftsklassen respektive -repräsentanten modelliert. Die aggregierte Form des Zusammenwirkens von Flughafen und Fluggesellschaften (respektive ihrer Repräsentanten) stellt der Flugplan dar, dem dritten ausschlaggebenden Element, dass in dieser Arbeit näher betrachtet wird (Kapitel 4.5). Weitere Elemente, die in dieser Arbeit nicht im Detail betrachtet werden, fasst Kapitel 4.6 zusammen.

### 4.1 Vorgehensweise

Die allgemeine Vorgehensweise der Modellierung kann mit einem sogenannten V-Modell<sup>90</sup> abgebildet werden. Jedoch erfolgt in dieser Arbeit, im Gegensatz zum klassischen Vorgehen, nicht eine phasenweise immer detaillierter werdende Spezifikation des Problems, sondern eine Verallgemeinerung, respektive eine Senkung der Komplexität (vgl. Abbildung 4-1).

Ausgangsbasis dieser Vorgehensweise bilden weltweit verteilte, individuelle Einzelflughäfen und deren Merkmalsausprägungen. Diese werden erhoben und analysiert, so dass Flughafenklassen auf Basis der Merkmalsausprägungen gebildet werden können. Es ergeben sich repräsentative Merkmale pro Flughafenklasse, die schließlich in sieben Flughafenrepräsentanten münden. Diese bilden alle weltweiten Flughäfen in ihren Grundmerkmalen ab.

Um die Flughafenklassen wiederum zu detaillieren, werden wichtige flughafennahe Elemente, wie die verkehrenden Fluggesellschaften und der zugrundeliegende Flugplan, modelliert. Dies geschieht ebenfalls auf Basis des V-Modells, so dass einerseits generische Fluggesellschaften und andererseits ein generischer Flugplan für die Flughafenrepräsentanten erzeugt werden. Durch eine Verifikation (Kapitel 5) mit realen Flughäfen soll aufgezeigt werden, dass die Verwendung von generischen Flughäfen bei bestimmten Anwendungen den Modellierungsaufwand erheblich reduziert.

---

<sup>90</sup> Das V-Modell ist ein Phasen- oder Vorgehensmodell und eine Weiterentwicklung des auf *Barry Boehm* zurückgehenden Wasserfallmodells mit zusätzlicher Rückkopplung, das heißt, der Integration einer ausdrücklichen Qualitätssicherung [148].

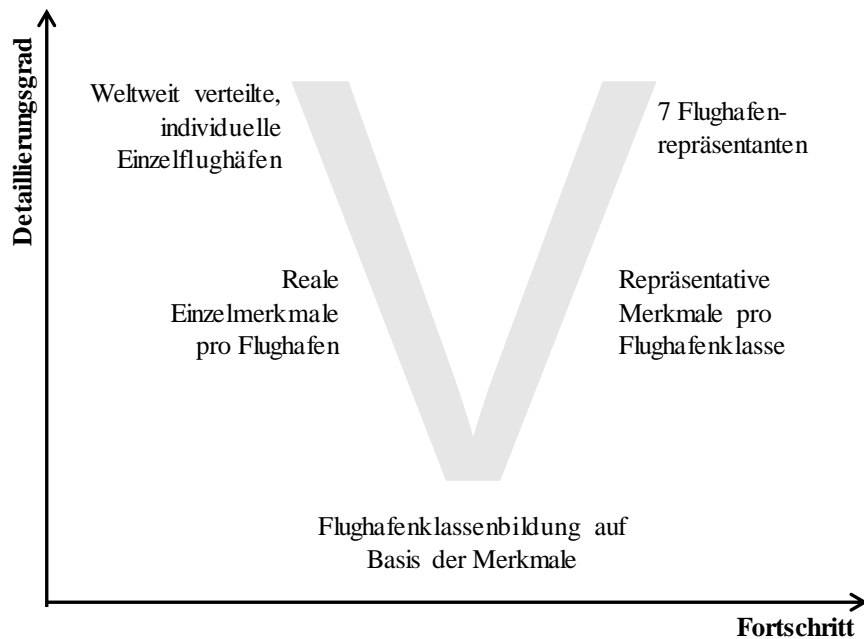


Abbildung 4-1: Vorgehensweise in Anlehnung an das V-Modell.

## 4.2 Definition von Flughafenklassen

Durch die Quantität und Heterogenität von Flughäfen ist es auf einem globalen Level nicht zweckmäßig einen einzelnen Flughafen zu betrachten und somit sinnvoll funktionale Gruppen für wissenschaftliche Untersuchungen und Simulationen zu generieren. Doch welche Flughafentypen gibt es und durch welche Eigenschaften zeichnen sich diese aus? Mittels der in Kapitel 4.2 dargelegten Clusteranalyse werden Hauptcharakteristiken eines Flughafens schrittweise definiert. Zunächst geht Kapitel 4.2.1 auf existierende Einteilungen von Flughäfen in der Literatur ein. Danach erfolgt das Aufzeigen der Grundgesamtheit und der Stichprobe (Kapitel 4.2.2) für die nachfolgende Analyse. Kapitel 4.2.3 widmet sich der Auswahl geeigneter Merkmale, die für die Clusteranalyse genutzt werden und Kapitel 4.2.4 der Clusteranalyse an sich. Die Wahl des Fusionsalgorithmus, die Clusteranzahl und die Bewertung der Clusteranalyse mittels verschiedener Techniken werden entsprechend dem in Kapitel 3.2 ausgeführten Vorgehen beschrieben. Anschließend werden die modellierten Flughafenklassen aufgezeigt und erläutert (Kapitel 4.2.5). Dieses Kapitel schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse ab (Kapitel 4.2.6).

In Bezug auf die Semantik gilt im Folgenden, dass eine Klasse bzw. ein Cluster aus einer Menge von Elementen (hier: Flughäfen oder Fluggesellschaften) besteht. Ein Repräsentant ist ein/e generische/r Flughafen/Fluggesellschaft, der/die eine Klasse vertritt, in dem dieser/diese typische Merkmale der Elemente im Mittel über alle Klassenelemente aufweist.

### 4.2.1 Einteilung von Flughäfen in der Literatur

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze Flughäfen in Gruppen zusammenzufassen. Eine Einteilung nach Geschäftsstrategien wird bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert. Weiterhin gibt es Abgrenzungen auf Basis definierter Schwellenwerte. Der *Airport Council International* (ACI), Dachverband der Flughafenbetreiber, unterteilt Flughäfen nach deren jährlicher Anzahl



**Tabelle 4-1: FAA Flughafen-Klassifizierung, in Anlehnung an [149].**

Airport Classification		Hub Type: Percentage of Annual Passenger Boardings	Common Name
Commercial Service: Publicly owned airports that have at least 2 500 passenger boardings each calendar year and receive scheduled passenger service §47102(7)	Primary: Have more than 10 000 passenger boardings each year §47102(11)	Large: 1 % or more	Large Hub
		Medium: At least 0.25 % but less than 1 %	Medium Hub
		Small: At least 0.05 % but less than 0.25 %	Small Hub
		Nonhub: More than 10 000 but less than 0.05 %	Nonhub Primary
	Nonprimary	Nonhub: At least 2 500 and no more than 10 000	Nonprimary Commercial Service
Nonprimary (Except Commercial Service)		Not Applicable	Reliver §47102(18)

an Passagieren in vier Gruppen: Von Gruppe 1 mit mehr als 25 Mio. Passagieren über Gruppe 2 mit 10 Mio. - 25 Mio. Passagieren bzw. Gruppe 3 mit 5 Mio. - 10 Mio. Passagieren bis hin zu Gruppe 4 mit weniger als 5 Mio. Passagieren [49] S. 8. Ähnlich verfährt die *Federal Aviation Administration* (FAA), obgleich die Gruppen auf Basis des Anteils der jährlich abfliegenden Passagiere aller US-Flughäfen definiert werden (vgl. Tabelle 4-1). Es werden sechs typische Flughafengruppen angegeben: *Large Hub*, *Medium Hub*, *Small Hub*, *Nonhub Primary*, *Nonprimary Commercial Service* und *Reliver*.

Die *Europäische Kommission* wiederum hat folgende Einteilung in vier Kategorien vorgenommen [150]:

- Kategorie A: *Große Gemeinschaftsflughäfen* mit über 10 Mio. Passagieren jährlich
- Kategorie B: *Nationale Flughäfen* mit 5 Mio. bis 10 Mio. Passagieren jährlich
- Kategorie C: *Große Regionalflughäfen* mit 1 Mio. bis 5 Mio. Passagieren jährlich
- Kategorie D: *Kleine Regionalflughäfen* mit weniger als 1 Mio. Passagieren jährlich

Diese in der Literatur vorgenommenen Klassifizierungen von Flughäfen sind nach starren, subjektiven Grenzen festgelegt und nicht zielführend für detaillierte wissenschaftliche Anwendungen, da sie auf starren Grenzen beruhen, welche sich weiterhin von Quelle zu Quelle teilweise erheblich unterscheiden. Die größte Gruppe bei der Abgrenzung des ACI beginnt bei 25 Mio. Passagieren pro Jahr und bei der EU bereits bei 10 Mio. Passagieren pro Jahr. Weiterhin sind in der Literatur Begriffe wie *Hub-Flughafen* oder *LCC-Flughafen* zu finden, jedoch meist nur mit qualitativen Merkmalen beschrieben (vgl. Kapitel 2.3.1).

Im Folgenden werden Flughafenklassen modelliert, mit dem Ziel, nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen über die verschiedenen Klassen zu treffen. Diese können im Anschluss an diese Arbeit als Grundlage für weiterführende Arbeiten verwendet werden.

#### 4.2.2 Grundgesamtheit und Stichprobe

Die Grundgesamtheit für die Modellierung von Flughafenklassen können theoretisch alle Flugplätze weltweit bilden. Die *Central Intelligence Agency* (CIA) gibt diese mit 41 820 an [151]. Jedoch wäre eine Betrachtung all dieser Flugplätze nicht zielgerichtet, da nur ein Bruchteil überhaupt über eine befestigte SLB verfügt. Circa 9 200 von diesen Flugplätzen besitzen einen *3-Letter-Code* der IATA [7], wobei Flüge der allgemeinen Luftfahrt (*General Aviation*) auf vielen Flugplätzen vorherrschend sind. Für die Zielstellung dieser Arbeit sind aber nur Flughäfen maßgeblich, an denen kommerzieller Luftverkehr betrieben wird. Laut *Sabre MI* [7] gab es im Jahr 2012 knapp 3 700 Zielflughäfen, zu denen mindestens 100 Passagiere pro Jahr geflogen sind, so dass diese als Grundgesamtheit angesehen werden können. Jedoch zeigt sich, dass eine exakte Definition der Grundgesamtheit für diese Arbeit schwierig ist.

Aus der Grundgesamtheit wird nun eine Stichprobe gezogen, wobei die Stichprobengröße ein wichtiger Faktor ist. *Jacob et al.* [152] S. 68 empfehlen, eine Mindestgröße von 100 Befragten<sup>91</sup> anzustreben, so dass die Wahrscheinlichkeit, typische Strukturen der Grundgesamtheit zu finden und nicht bestimmte Ausreißer oder marginale Konfigurationen, deutlich erhöht wird. Des Weiteren gilt für Subgruppen-Analysen als Faustregel, dass entsprechende Subgruppen mit mindestens 20 - 25 Fällen besetzt sein sollten, wenn die Aussagen für diese Gruppen noch zu interpretationsfähigen Aussagen führen sollen.

Die Ergebnisse einer Stichprobenbefragung können unter Verwendung mathematisch-statistischer Verfahren nur dann auf die Grundgesamtheit verallgemeinert werden, das heißt als *repräsentativ* angesehen werden, wenn sie auf einer Zufallsauswahl der Stichprobenelemente basieren [152] S. 66. Demnach muss jedes Element der Grundgesamtheit die gleiche Auswahlchance haben, in die Stichprobe zu gelangen. Klassisches Beispiel hierfür ist das Urnenmodell (siehe Kapitel 3.3.3). Jedoch sind auch nicht zufällige Auswahlverfahren als wissenschaftliche Verfahren zu qualifizieren, wenn diese nachvollziehbar durchgeführt werden.

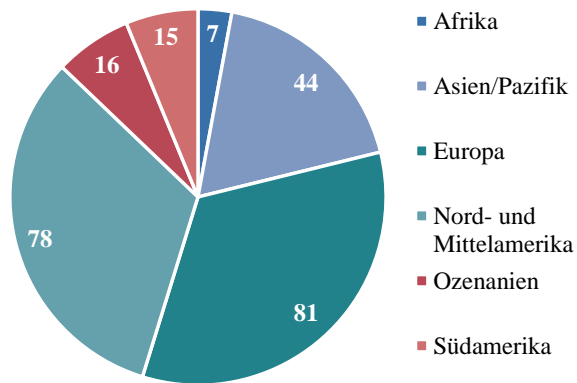
Die Auswahl der Flughäfen für diese Arbeit kann im Grunde auf die Datenverfügbarkeit reduziert werden. Für die im *ATRS Global Airport Benchmarking Report* (siehe Kapitel 3.5) enthaltenen Flughäfen gibt es eine ausreichende Datenverfügbarkeit. Hierzu ergänzt werden verschiedene deutsche Verkehrsflughäfen sowie für das globale LTS bedeutende Flughäfen aus Südamerika und Afrika, da diese in dem Report gänzlich fehlen. Jedoch ist bezüglich dieser Flughäfen die Datenlage auf Basis öffentlich zugänglicher Quellen mäßig<sup>92</sup>.

Insgesamt werden 241 Flughäfen in die Stichprobe für die Modellierung der Flughafenklassen einbezogen. Das heißt im Umkehrschluss, dass die Stichprobe als nicht *repräsentativ* für die Grundgesamtheit angesehen werden kann. Nichtsdestotrotz umfasst die Stichprobe eine ausreichende Anzahl an Flughäfen, die ca. 61 % aller weltweit abfliegenden Passagiere abdecken (Stand: 2012, [7]). Eine Zufallsauswahl aus der Grundgesamtheit ist nicht zielführend, da die Bedeutung der Flughäfen für das LTS nicht gleichverteilt ist. Insofern sind manche Flughäfen wichtiger für die Modellierung als andere (siehe auch Kapitel 4.2.6).

---

<sup>91</sup> *Jacob et al.* gehen hier auf Methoden der Umfrageforschung ein. Die Anzahl der Befragten kann hier mit der Anzahl an Flughäfen gleichgesetzt werden.

<sup>92</sup> Geschäftsberichte südamerikanischer bzw. afrikanischer Flughäfen enthalten wenige bis keine statistischen Daten.



**Abbildung 4-2: Geografische Verteilung der Flughäfen des Stichprobenumfangs.**

Die geografische Verteilung der Flughäfen zeigt Abbildung 4-2. Je circa ein Drittel der Flughäfen befinden sich in Europa (81 Flughäfen) bzw. Nord- und Mittelamerika (78 Flughäfen). Das letzte Drittel setzt sich aus Flughäfen der verbliebenen Weltregionen zusammen.

#### 4.2.3 Auswahl der Merkmale

Die verfügbaren Merkmale<sup>93</sup> (z. B. das *Passagieraufkommen pro Jahr*, der *Anteil der Umsteiger*, etc.) sind in Tabelle 4-2 aufgeführt, welche in vier Kategorien eingeteilt werden: *Infrastruktur*, *Betrieb*, *Finanzen* und *Effizienz*. Jedoch konnten nicht für alle 241 Flughäfen Daten für jedes einzelne Merkmal erhoben werden. Da die Stichprobengröße durch die Auswahl nicht reduziert werden soll, ist die Auswahl und Aussagekraft eines Merkmals für die Verwendung innerhalb der Clusteranalyse einschränkt. Bei Merkmalen, bei denen nur vereinzelt Werte fehlen, kann das Verfahren der *Imputation* [121] S. 38 genutzt werden. *Imputation* gehört zu den sogenannten *Missing-Data* Techniken und ist eine gängige Methode in der Praxis<sup>94</sup>, wobei plausible Annahmen für die fehlenden Werte<sup>95</sup> auf Basis der verfügbaren Werte generiert werden<sup>96</sup>. Anderenfalls würden alle unvollständigen Datensätze von der Analyse ausgeschlossen werden, was speziell bei multivariaten Verfahren wie der Clusteranalyse zu einer signifikanten Reduzierung des Stichprobenumfangs führen kann [153] S. 178.

Die im Folgenden stattfindende Auswahl der Merkmale, welche später in die Clusteranalyse einfließen, erfolgt analog zu den Erläuterungen in Kapitel 3.2.1. Das heißt, die Merkmale wurden zunächst kategorisiert und geprüft, inwieweit diese miteinander korrelieren. Ausführlichere Erläuterungen und Definitionen zu den einzelnen Merkmalen von Flughäfen und ausgewählte Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind im Anhang C zu finden.

<sup>93</sup> Die Datenquellen sind in Kapitel 3.5 aufgeführt.

<sup>94</sup> Vor allem bei Umfragen mit sozialem Hintergrund treten typischerweise oft Antwortausfälle bei Fragen zu Gehalt oder zu Religionszugehörigkeit auf [153] S. 177.

<sup>95</sup> In der Statistik auch als Antwortausfälle bezeichnet.

<sup>96</sup> Für die Berechnung wird auf den Mittelwert und die Kovarianzmatrix der verfügbaren Werte zurückgegriffen [121] S. 38.

**Tabelle 4-2: Kategorisierte, verfügbare Flughafenmerkmale; hellgrau: als maßgebend erachtete Merkmale; dunkelgrau: ausgewählte Merkmale, die in die Clusteranalyse einfließen.**

Infrastruktur	Betrieb	Finanzen	Effizienz
Anzahl an Start- und Landebahnen (SLB)	Passagiere [PAX/Jahr]	Erlös [US\$]	Erlös/PAX [US\$/PAX]
Anz. an Abstellpositionen	Flugbewegungen [FB/Jahr]	Flugbezogener (Verkehrs-) Erlös [%]	Minimale Umsteigezeit [min]
SLB Anordnung/Betrieb	Arbeitseinheit (WLU/Jahr)	Nicht-flugbezogener (kommerzieller) Erlös [%]	Arbeitseinheit/Arbeiter [WLU/Arbeiter]
Max. SLB Länge [m]	Fracht [Tonnen/Jahr]	Terminal-Passagierentgelt [US\$]	Flugbewegungen/SLB [FB/SLB]
Max. SLB Breite [m]	Umsteiger [%]	Landeentgelt [US\$]	
Anz. an Gates	Internationale PAX [%]		
Distanz zum Stadtzentrum [km]	Verkehrsmix [%]		
Terminalgröße [m <sup>2</sup> ]	FB-Anteil pro Fluggesellschaftsklasse [%]		

Infrastrukturelle Begebenheiten eines Flughafens bestimmen maßgeblich die Gesamtkapazität und daraus folgend die Leistungsfähigkeit eines Flughafens. Die *Anzahl der SLB* und der *LFZ-Abstellpositionen* werden hier als die beiden wichtigsten, luftseitigen Merkmale der Flughafeninfrastruktur angesehen, wie auch *Schmitt und Gollnick* ausführen [106] S. 229<sup>97</sup>. Für weniger als die Hälfte der Flughäfen liegen Werte für die LFZ-Abstellpositionen vor, so dass dieses Merkmal nicht für die Clusteranalyse herangezogen wird. *SLB Anordnung/Betrieb* ist weiterhin ein ausschlaggebendes Merkmal in Bezug auf die An-/Abflugkapazität. Da dies ein nominales Merkmal ist, kann diese ebenfalls nicht einbezogen werden. Die Merkmale *max. SLB Länge*, *max. SLB Breite*, *Anzahl an Gates* und *Distanz zum Stadtzentrum* haben geringe Auswirkungen auf die Gesamtkapazität und werden deshalb nur als beschreibende Merkmale betrachtet.

Weitere Indikatoren für Flughäfen sind die spezifischen Kapazitäten verschiedener Flughafeninfrastrukturen, wie z. B. die oben genannte An-/Abflugkapazität des SLB-Systems. Jede spezifische Kapazität für sich beeinflusst die Gesamtkapazität des Flughafens. Diese werden aber von zahlreichen weiteren Faktoren beeinflusst. Die SLB-Kapazität ist unter anderem von nationalen *Air Traffic Control* (ATC) Regularien, den Wetterbedingungen, den An-/Abflugrouten und der technischen Ausstattung abhängig, so dass die SLB-Kapazität einer starken Volatilität unterliegt. Weiterhin trägt die Terminalkapazität zur Gesamtkapazität eines

<sup>97</sup> *Schmitt und Gollnick* nennen zwar die Vorfeldgröße, aber im Hinblick auf den Flugbetrieb kann die Anzahl der Abstellpositionen für LFZ jener Charakteristik gleichgesetzt werden.

Flughafens bei. Dabei ist aber nicht nur die Terminalgröße<sup>98</sup> von Bedeutung, sondern auch weitere Merkmale, unter anderem die Anzahl an Check-in Schaltern und Sicherheitskontrollen (vgl. [62]). Im Sinne einer bewussten Abstraktion wird auf die Betrachtung solch spezifischer Kapazitäten verzichtet. Kapitel 4.5.5 geht jedoch teilweise auf die SLB-Kapazität und die Regulierung des Flugbewegungswachstums näher ein.

Die Schlüsselkategorie zur Modellierung von Flughäfen ist der Betrieb. Maßgebliche Merkmale sind dabei das *Passagieraufkommen pro Jahr*, die *Flugbewegungen pro Jahr*, die *Arbeits-einheiten pro Jahr*, das *Frachtvolumen pro Jahr* und der *Anteil der Umsteiger*. Die Korrelationsanalyse zeigt, dass die drei erstgenannten Merkmale untereinander hochkorrelativ sind (siehe Anhang C). Dennoch werden sowohl das *Passagieraufkommen pro Jahr* als auch der *Flugbewegungen pro Jahr* in die Clusteranalyse eingebunden, da beide zwei unterschiedliche Strategien zur Generierung von Erlösen aufzeigen<sup>99</sup>. Ein bestimmtes Passagieraufkommen kann einerseits mit vielen Flugbewegungen mittelgroßer LFZ und andererseits mit wenigen Flugbewegungen großer LFZ erreicht werden (siehe Kapitel 2.3.1). Für die Clusteranalyse kommen noch die Merkmale *Frachtvolumen pro Jahr* und *Anteil der Umsteiger* hinzu. Ersteres bildet einen weiteren wichtigen Geschäftsbereich und damit verbundenen Erlösfaktor von Flughäfen ab. Letzteres ist ein wichtiger Indikator für *Hub*-Flughäfen. In Bezug auf das *Frachtvolumen pro Jahr* konnten die Werte für 18 Flughäfen<sup>100</sup> nicht ermittelt werden. Somit kommt hier das oben genannte Verfahren der Imputation zur Anwendung, da nur eine geringe Anzahl an Werten fehlt.

Bezüglich der Kategorie Finanzen ist die Datenbasis eingeschränkt, so dass keines der Merkmale gewählt wird. Die *Erlöse* liegen z. B. nur für 173 der 241 Flughäfen vor. Bei solch einer Diskrepanz ist auch die Anwendung der Imputation nicht zielführend und wird somit verworfen. Wie in Kapitel 2.3.2 bereits erwähnt, ist ein weiterer Grund keine erlösbezogenen Kennzahlen direkt in die Clusteranalyse einzubinden, die nicht eindeutige Zuordnung von Erlösen der Flughäfen. Beispielsweise ordnen Flughafenbetreiber, die die Bodenverkehrsdienstleistung selbst durchführen, die Erlöse den Verkehrserlösen (*Aviation Revenues*) zu. Andererseits können diese Dienstleistungen auch durch Dritte übernommen werden, so dass Erlöse den kommerziellen Erlösen (*Non-Aviation Revenues*) in Form von Konzessionen und/oder Mieten zugerechnet werden [49] S. 215. Des Weiteren beeinflusst die Höhe von Erlösen durch Tertiärfunktionen (siehe Kapitel 2.2.2) die Gesamterlöse. Ein Einbeziehen würde unweigerlich zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen.

Bei der Effizienz-Kategorie ist die Situation ähnlich. Zwar sind die *minimale Umsteigezeit* oder der *Erlös pro Passagier* wichtige Indikatoren für Flughäfen. Jedoch fehlt bei ersterem wiederum die Datenbasis und bei letzterem ist o. g. Grund bzgl. der Erlöszuordnung anzubringen, diesen nicht in die Clusteranalyse einzubinden. Dadurch beschränken sich die Merkmale, die in die Clusteranalyse für Flughäfen einfließen, auf die Kategorien Infrastruktur und Betrieb.

Die geografische Lage der Flughäfen wird zwar datentechnisch erfasst, spielt jedoch bei der Erstellung der Flughafenklassen explizit keine Bedeutung. Das Ziel ist die Modellierung von

---

<sup>98</sup> Diese konnte aufgrund der Größe der Stichprobe und der geringen Datenverfügbarkeit ebenfalls nur in ungenügender Anzahl für die Stichprobe erhoben werden.

<sup>99</sup> Diese werden ebenso von *Schmitt und Gollnick* als charakteristisch für Flughäfen genannt [106] S. 229.

<sup>100</sup> Vor allem für südamerikanische und teilweise auch ozeanische Flughäfen ist das Auffinden valider Daten bzgl. des Frachtvolumens schwierig. Die imputierten Werte sind in Tabelle 8-7 (8.3Anhang C) markiert.

globalen Flughafenklassen. Die Betrachtung einzelner Weltregionen würde zu einer Klassifizierung der Flughäfen pro Weltregion führen, so dass die Gesamtanzahl der Klassen ein unübersichtliches Ausmaß annehmen würde.

#### 4.2.4 Clusteranalyse I - Flughäfen

Mittels einer Clusteranalyse<sup>101</sup> ist es im Folgenden das Ziel, eine repräsentative und handhabbare Anzahl an funktionalen Flughafenklassen zu finden, wobei die wesentlichen Merkmale von Flughäfen einbezogen werden und eine weltweite Abdeckung vorhanden ist. Das Vorgehen entspricht der in Kapitel 3.2.2 bis 3.2.5 erläuterten Reihenfolge unter Anwendung der dort aufgeführten Methoden. Erste Studien und Ergebnisse hierzu wurden bereits in [154] veröffentlicht.

##### 4.2.4.1 Fusionsalgorithmus

Zur Anwendung kommt das hierarchisch, agglomerative *Ward-Linkage* Verfahren. Dieses Verfahren stellte sich während der Analyse als robust und am besten geeignet für diese Stichprobe heraus. Weiterhin ergeben sich eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und keine Einflussnahme durch Vorgabe (bzw. durch zufällige Verteilung, wie bei partitionierenden Verfahren) von Clusterschwerpunkten zu Beginn der Klassifizierung. Die Recherche zum Stand der Wissenschaft (vgl. Kapitel 3.2.6) zeigt obendrein, dass das *Ward-Linkage* einer der am häufigsten genutzten Fusionsalgorithmen bei der Nutzung von Clusterverfahren ist.

Die Merkmale werden im Laufe des Prozesses automatisch standardisiert (vgl. Kapitel 3.2.3). Weiterhin besteht das Problem, dass nicht für alle Flughäfen die Daten zum Frachtumschlag pro Jahr vorliegen. Dieses Merkmal ist jedoch als bedeutend identifiziert worden und soll in die Analyse eingebunden werden. Da nur 18 Werte fehlen<sup>102</sup>, wird das Verfahren der *Imputation* (vgl. Kapitel 4.2.3) angewendet.

##### 4.2.4.2 Clusteranzahl

Zur Bestimmung der Clusteranzahl wird die *L method* (vgl. Kapitel 3.2.5) herangezogen. Unter Einbindung des vollständigen Clusterverlaufs (siehe Tabelle 8-7) ergibt sich in der ersten Iteration ein minimaler  $RMSE_c$  bei einer Clusteranzahl von 23. Da diese Lösung eine zu große Anzahl an Clustern darstellt, wird, wie von *Salvador und Chan* empfohlen, eine zweite Iteration mit einer reduzierten Anzahl von 46 Elementen (die doppelte Anzahl der ersten gefundenen Lösung) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4-3 grafisch dargestellt.

---

<sup>101</sup> Die statistischen Analysen werden mit der Statistiksoftware *JMP* durchgeführt.

<sup>102</sup> Zehn dieser Flughäfen befinden sich in Afrika bzw. Südamerika, wo Daten verhältnismäßig schlecht zu recherchieren sind.

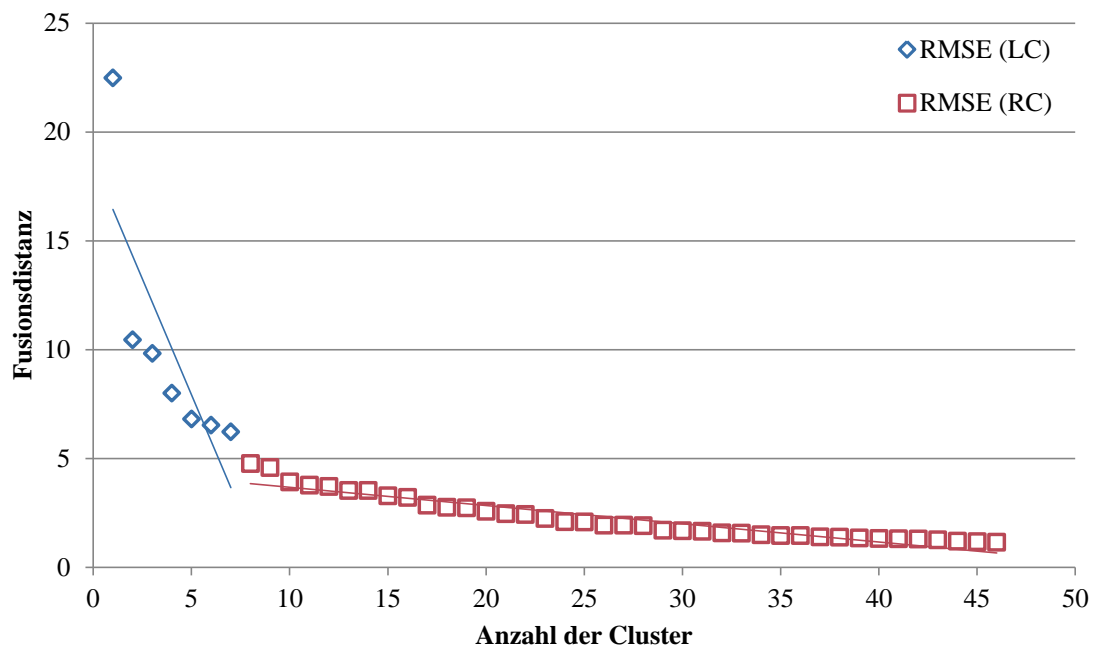


Abbildung 4-3: Auffinden der Clusteranzahl für Clusteranalyse I unter Nutzung der L method.

Der Knick und folglich der numerisch ermittelte, minimale  $RMSE_C$  befindet sich bei einer Clusteranzahl von sieben. Weiterhin gut zu erkennen ist, dass es bis zu einer Anzahl von ca. neun Cluster ein kontinuierlicher Verlauf mit nur geringer Zunahme der Fusionsdistanz zwischen den Lösungen ist. Der deutlichste Sprung zeigt sich, wie die numerische Analyse auch bestätigt, im Übergang von sieben zu acht Cluster. Das Dendrogramm der Clusteranalyse I, das den vollständigen Fusionsprozess der Flughäfen grafisch darstellt, ist im Anhang C in Abbildung 8-4 dargestellt.

#### 4.2.4.3 Silhouetten

Nächster Schritt ist die Bewertung der gefundenen Lösung (vgl. Kapitel 3.2.5). Die Silhouetten der Cluster werden betrachtet, wobei sich zunächst folgende Silhouetten mit einem durchschnittlichen Silhouettenkoeffizienten über alle Cluster von  $\bar{s}_C = 0,25$  [Intervall von 0,08 bis 0,55] ergeben (vgl. Abbildung 4-4).

Zu erkennen ist, dass nur Cluster 3, 4 und 6 ausschließlich positive Silhouettenwerte  $s(i)$  ausweisen. Objekte der verbliebenen Cluster haben auch negative Silhouettenwerte, das heißt, diese liegen im Mittel näher an den Objekten des Nachbarclusters. Infolgedessen werden diese Objekte dem Cluster mit dem geringsten  $b(i)$ -Wert, also der durchschnittlichen Distanz zum ähnlichsten Cluster, zugeordnet. Dadurch entstehen „optimierte“ Silhouetten, die in Abbildung 4-5 dargestellt sind. Nichtsdestotrotz ergeben sich nur niedrige durchschnittliche Silhouettenkoeffizienten in einem Intervall von  $\bar{s}_7 = 0,13$  (Cluster 7) bis  $\bar{s}_3 = 0,51$  (Cluster 3). Über alle Cluster betrachtet, ist  $\bar{s}_C = 0,27^{103}$ .

<sup>103</sup>  $\bar{s}_C$  kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei hohe positive Werte auf eine große Ähnlichkeit zu Objekten desselben Clusters deuten. Werte um Null geben an, dass das Objekt nicht eindeutig einem Cluster zuzuordnen ist.

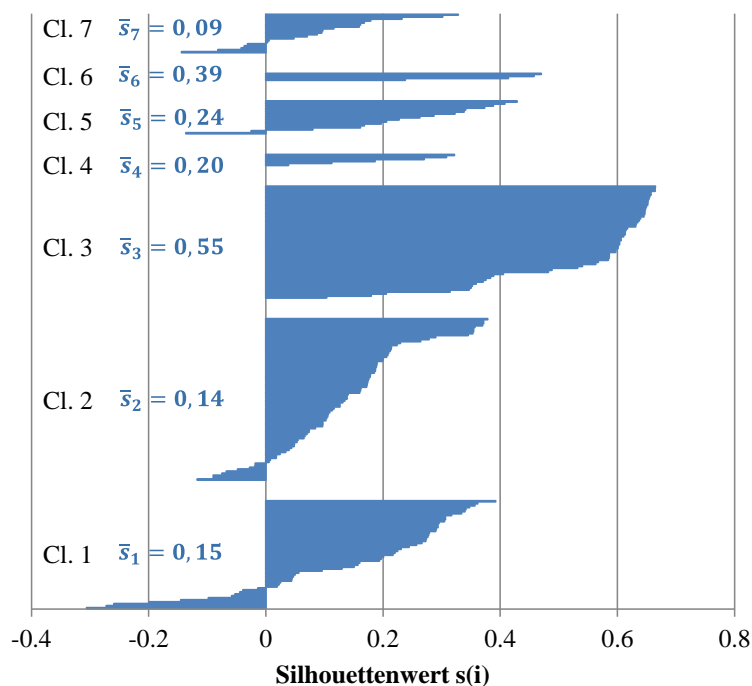


Abbildung 4-4: Silhouetten der Clusteranalyse I, vor der Optimierung.

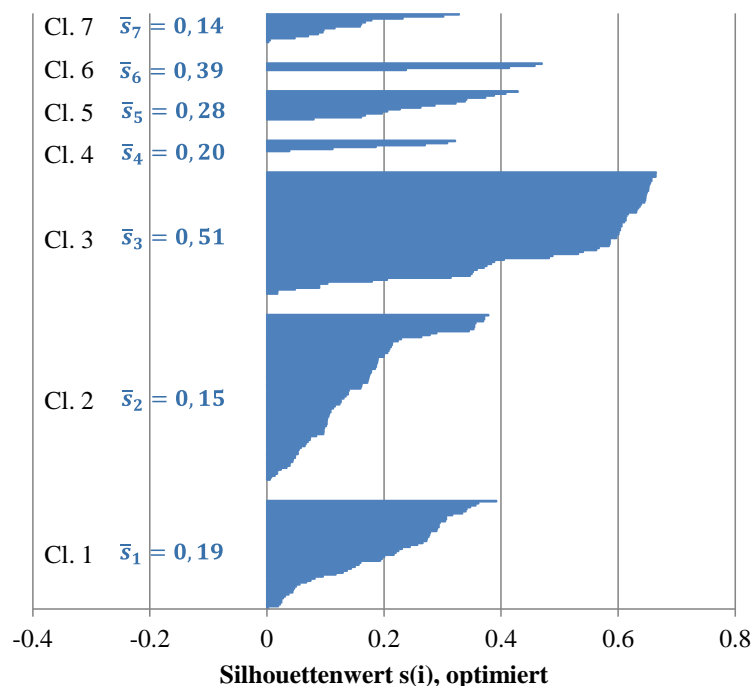


Abbildung 4-5: Silhouetten der Clusteranalyse I, nach der Silhouettenoptimierung.

Es kommt die Frage auf, warum der Silhouettenkoeffizient nur schwach ausgeprägt ist? Ein Grund ist, dass das LTS kein in sich abgeschlossenes System darstellt<sup>104</sup>. Die Stakeholder des LTS unterliegen Wechselwirkungen mit deren Umwelt sowie auch untereinander (vgl. Kapitel 2.1). Des Weiteren ist die Entwicklung durch externe Faktoren und zunehmenden Wettbewerb geprägt, die zu einer Nischenentwicklung der Flughäfen führt, um sich von der Konkurrenz

<sup>104</sup> Im Vergleich zu anderen Datenerhebungen gibt es keine natürlichen Grenzen.



abzuheben. In der Folge steigt die Heterogenität zwischen den einzelnen Elementen und erschwert zusätzlich eine Homogenisierung. Auch Azzam [101] erreicht bei seiner finalen Clusteranalyse nur einen durchschnittlichen Silhouettenkoeffizienten von 0,44 [Intervall von 0,21 bis 0,72], wobei er den Fokus nur auf netzwerktheoretische Merkmalen der Flughäfen liegt.

Die Ergebnisse der Clusteranalyse I werden im Folgenden aufgezeigt und die einzelnen Flughafenklassen diskutiert sowie miteinander verglichen.

#### 4.2.5 Klassen von Flughäfen

Auf Basis der Clusteranalyse lassen sich sieben verschiedene Klassen von Flughäfen festlegen, die in Tabelle 4-3<sup>105</sup> aufgeführt sind. Ebenfalls werden die klassenspezifischen Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) für die jeweiligen Merkmale aufgezeigt. Hervorgehoben sind die Klassen mit dem kleinsten (hellgrau) und größten (dunkelgrau) Wert in Bezug auf das jeweilige Merkmal. Tabelle 4-4 ergänzt diese Übersicht durch weitere, die jeweiligen Klassen beschreibende Merkmale. Weitere, ausführlichere Ergebnisse (Auflistung der Flughäfen mit Clusterzugehörigkeit, Median und Quantil der einzelnen Merkmale) sind im Anhang C zu finden.

**Tabelle 4-3: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Merkmale pro Flughafenklasse, die in die Clusteranalyse einfließen, gerundet, 2012.**

FH-Kl.	#	Name	Passagiere [PAX/Jahr]	Flug- bewegungen [FB/Jahr]	Fracht [Tonnen/ Jahr]	Um- steiger [%]	# SLB
1	55	<i>Internationale FH</i>	24 220 000 (±9 689 000)	238 000 (±65 000)	290 000 (±281 000)	17,0 (±11,0)	3 (±0,85)
2	84	<i>Große Regional-FH</i>	8 248 000 (±4 980 000)	100 000 (±42 000)	114 000 (±181 000)	7,0 (±7,0)	2 (±0,63)
3	62	<i>Kleine Regional-FH</i>	6 236 000 (±4 563 000)	69 000 (±45 000)	66 000 (±107 000)	5,0 (±8,0)	1 (±0,18)
4	6	<i>Fracht-Hub-FH</i>	26 190 000 (±23 606 000)	260 000 (±90 000)	<b>3 123 000 (±730 000)</b>	21,0 (±17,0)	3 (±0,63)
5	15	<i>Internationale Hub-FH</i>	54 690 000 (±12 606 000)	406 000 (±96 000)	1 635 000 (±402 000)	28,0 (±14,0)	3 (±1,03)
6	4	<i>Hochfrequenz- Hub-FH</i>	<b>65 475 000 (±17 483 000)</b>	<b>762 000 (±158 000)</b>	760 000 (±531 000)	<b>53,0 (±10,0)</b>	<b>6 (±0,96)</b>
7	15	<i>Sekundäre Hub- FH</i>	30 275 000 (±11 192 000)	358 000 (±137 000)	324 000 (±199 000)	45,0 (±17,0)	4 (±1,29)

<sup>105</sup> Die Nummer der Cluster dient lediglich zur Identifizierung und stellt keine Reihenfolge dieser dar.

**Tabelle 4-4: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) von Merkmalen pro Flughafenklasse, zur Beschreibung der Cluster, gerundet, 2012**

FH-Kl.	Verkehrsmix <sup>106</sup> [%]				Erlös/ PAX [US\$]	Erlös [US\$]	Distanz zum Stadtzen- trum <sup>107</sup> [km]	SLB- Anordnung/ Betrieb
	S	H	M	L				
1	0,0 (±0,0)	13,0 (±13,0)	86,0 (±13,0)	1,0 (±2,0)	18,75 (±9,42)	472 405 000 (±327 980 000)	21,60 (±11,67)	parallel/ unabhängig
2	0,0 (±0,0)	9,0 (±14,0)	90,0 (±14,0)	1,0 (±3,0)	18,89 (±11,20)	170 458 000 (±190 008 000)	17,64 (±10,48)	kreuzend/ abhängig
3	0,0 (±0,0)	6,0 (±10,0)	<b>93,0 (±10,0)</b>	1,0 (±3,0)	18,08 (±9,65)	118 279 000 (±112 536 000)	19,61 (±19,17)	Einbahn- system
4	0,0 (±0,0)	27,0 (±30,0)	69,0 (±29,0)	3,0 (±5,0)	22,16 (±8,51)	668 758 000 (±713 276 000)	28,75 (±19,53)	parallel/ unabhängig
5	<b>1,0 (±1,0)</b>	<b>37,0 (±18,0)</b>	62,0 (±18,0)	0,0 (±1,0)	<b>26,65 (±15,23)</b>	<b>1 394 792 000 (±847 147 000)</b>	28,61 (±17,47)	parallel/ unabhängig
6	1,0 (±2,0)	11,0 (±7,0)	88,0 (±7,0)	0,0 (±0,0)	9,26 (±3,42)	564 575 000 (±134 262 000)	<b>31,03 (±9,72)</b>	System/ unabhängig
7	0,0 (±0,0)	14,0 (±14,0)	85,0 (±14,0)	1,0 (±2,0)	12,29 (±7,10)	446 174 000 (±275 015 000)	21,32 (±11,13)	parallel/ unabhängig

Im Folgenden werden die einzelnen Flughafenklassen beschrieben und deren Vertreter aufgezeigt, wobei auf einzelne Werte aus Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 näher eingegangen wird. Begonnen wird mit den *Kleinen Regionalflughäfen* und die „Größe“ der Flughäfen nimmt schrittweise zu. Abschließend wird auf die *Fracht-Hub-Flughäfen* eingegangen.

#### *Kleine Regionalflughäfen (Small Regional Airports), FHK 3*

Die Klasse der *Kleinen Regionalflughäfen* umfasst 62 Einzelflughäfen. Im Durchschnitt nutzen ca. 6,2 Mio. Passagiere pro Jahr diese Flughäfen, wobei 69 000 Flugbewegungen verzeichnet werden. Das Frachtvolumen ist mit 66 000 Tonnen pro Jahr kaum nennenswert. Die Flughäfen betreiben fast ausschließlich nur eine SLB und werden zu 93 % von Flugzeugen der *Medium-Kategorie* angefliegen, der höchste Wert aller Klassen. Folglich kann der Anteil anderer Flugzeuggrößen vernachlässigt werden.

Aufgrund der Größe befinden sich diese Flughäfen aus ökonomischer Sicht im Vergleich zu den anderen Flughafenklassen am Ende der Rangfolge. Im Durchschnitt verdienen sie pro Passagier 18,08 US\$, was zu einem jährlichen Gesamterlös von ca. 118 Mio. US\$ führt (vgl. Tabelle 4-4, Zeile 3<sup>108</sup>). Deren Entfernung zum jeweiligen Stadtzentrum beträgt 19,6 km. Einzig *Große Regionalflughäfen* befinden sich mit durchschnittlich 17,6 km näher an den Stadtzentren. Typische Vertreter dieser Klasse sind in Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 dargestellt, z. B. die deutschen Flughäfen *Dresden* (DRS) und *Nürnberg* (NUE) oder der neuseeländische Hauptstadtflughafen in *Wellington* (WLG).

<sup>106</sup> Verkehrsmix nach ICAO Wirbelschleppenkategorien: S - *Super*, H - *Heavy*, M - *Medium*, S - *Small*.

<sup>107</sup> Entspricht der Strecke der schnellsten Route vom Flughafen ins Stadtzentrum. Quelle: [www.google.de/maps](http://www.google.de/maps), zuletzt geprüft am 23. November 2017.

<sup>108</sup> Bei den Zeilenangaben für Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 wird die Kopfzeile der Tabelle nicht mit einbezogen.

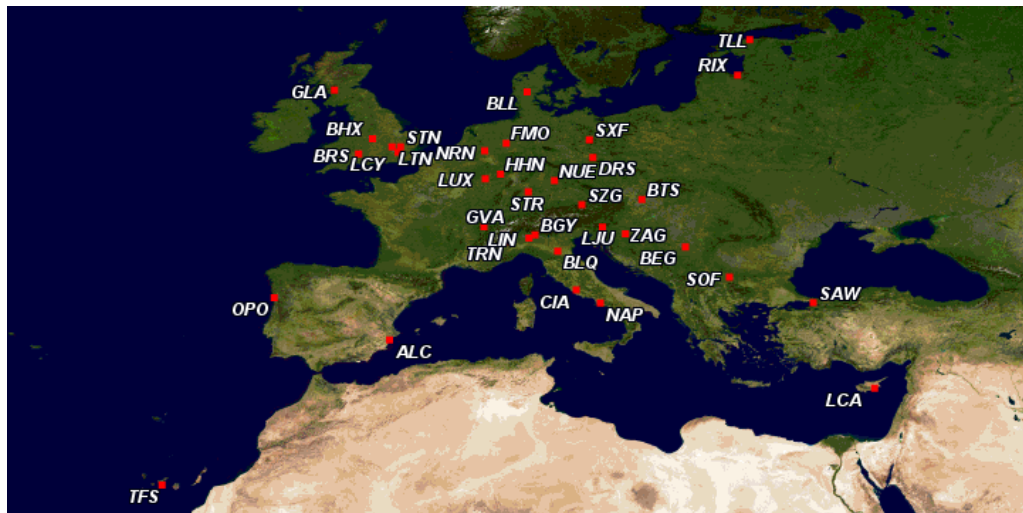


Abbildung 4-6: Kleine Regionalflughäfen in Europa, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code<sup>109</sup>, Quelle: [155].



Abbildung 4-7: Kleine Regionalflughäfen, alle Regionen außer Europa, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].

### Große Regionalflughäfen (Big Regional Airports), FHK 2

Große Regionalflughäfen bilden mit 84 Flughäfen die umfangreichste Flughafenklasse. Diese Flughäfen haben durchschnittlich 2 SLB, die mehrheitlich kreuzend angeordnet sind (34 Flughäfen), demnach nur abhängig voneinander betrieben werden können<sup>110</sup>. Jedoch ist auch die parallele Konfiguration (20 Flughäfen parallel/abhängig und 19 Flughäfen parallel/unabhängig) weit verbreitet innerhalb dieser Klasse. Folglich ist in Bezug auf die SLB Anordnung kein eindeutiger Trend zu erkennen. Die betrieblichen Kennzahlen steigen im Vergleich zu den *Kleinen Regionalflughäfen* auf durchschnittlich 8,3 Mio. Passagiere und 100 000 Flugbewegungen pro Jahr (vgl. Tabelle 4-3, Zeile 2). 7 % der Passagiere nutzen *Große Regionalflughäfen* als Umsteigepunkt. Der Anteil der *Medium*-Flugzeuge sinkt auf 90 %, wobei gleichzeitig der *Heavy*-Anteil auf 9 % anwächst. Die abgefertigte Fracht verdoppelt sich

<sup>109</sup> Eine Suchfunktion für IATA 3-Letter-Codes von Flughäfen ist unter [www.world-airport-codes.com](http://www.world-airport-codes.com) zu finden, zuletzt geprüft am 20. Februar 2018.

<sup>110</sup> Hinzu kommen zehn Flughäfen, die konvergierende SLB besitzen.

annähernd auf ca. 114 000 Tonnen jährlich. Die betriebswirtschaftlichen Zahlen steigen nur leicht an. Der Erlös pro Passagier beträgt bei den *Großen Regionalflughäfen* 18,89 US\$ und somit kaum mehr als bei den *Kleinen Regionalflughäfen*. Der jährliche Gesamterlös beläuft sich auf ca. 170 Mio. US\$. Abbildung 4-8 bis Abbildung 4-10 zeigen die Vertreter dieser Flughafenklasse, worunter z. B. der Flughafen *Hamburg* (HAM) oder der isländische Flughafen *Keflavík* (KEF) fallen. *Große Regionalflughäfen* befinden sich mit durchschnittlich 17,6 km geringfügig näher am Stadtzentrum im Vergleich zu den *Kleinen Regionalflughäfen*.



Abbildung 4-8: Große Regionalflughäfen in Europa, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].



Abbildung 4-9: Große Regionalflughäfen in Nordamerika, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].



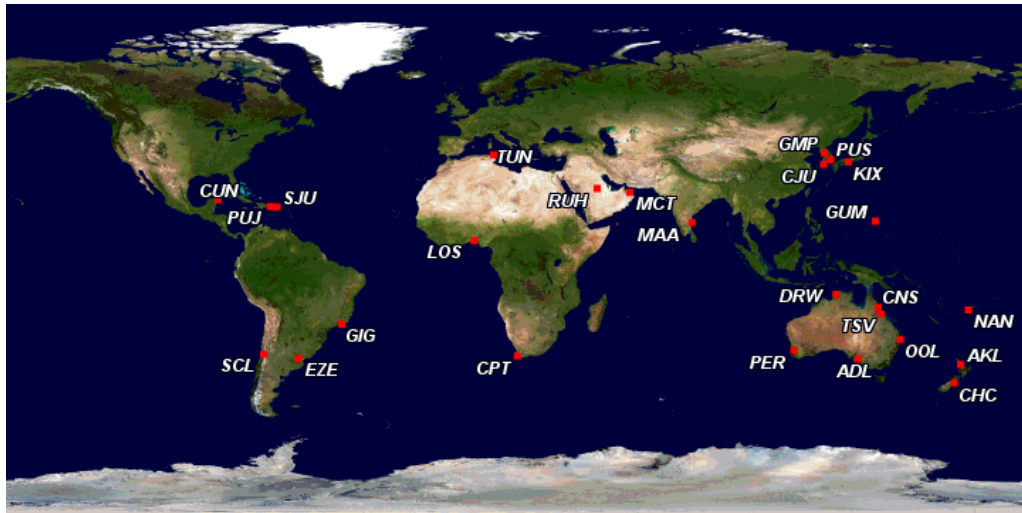


Abbildung 4-10: Große Regionalflughäfen in Asien/Pazifik, Ozeanien und Südamerika, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].

### Internationale Flughäfen (International Airports), FHK 1

Mit 22,2 Mio. Passagieren und rund 238 000 Flugbewegungen jährlich (vgl. Tabelle 4-3, Zeile 1) setzt sich diese Klasse aus *Internationalen Flughäfen* (55 Flughäfen) zusammen. Die Bedeutung der Flughäfen steigt im Vergleich zu den *Großen Regionalflughäfen* weiter an. Der Anteil von *Heavy*-Flugzeugen am Verkehrsmix beträgt 13 % und der *Medium*-Anteil 86 %. Auch der Anteil der Umsteiger wächst auf 17 %. Infrastrukturell sind diese Flughäfen mit durchschnittlich 3 SLB ausgestattet, wobei mehrheitlich (28 Flughäfen) mindestens zwei parallel zueinander ausgerichtet sind und unabhängig voneinander betrieben werden können. Beim Frachtumschlag können diese Flughäfen jährlich 290 000 Tonnen umsetzen. Der Erlös pro Passagier liegt mit 18,85 US\$ im Bereich der *Regionalflughäfen*. Aufgrund der größeren Passagierzahl liegt der Jahreserlös dennoch bei 472 Mio. US\$. *Internationale Flughäfen* befinden sich im Durchschnitt auch kaum weiter vom Stadtzentrum entfernt (knapp 22 km) als die *Regionalflughäfen*. Die geografische Verteilung der Flughäfen dieser Klasse zeigen Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12.



Abbildung 4-11: Internationale Flughäfen in Afrika, Europa, Asien/Pazifik und Ozeanien, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].



Abbildung 4-12: Internationale Flughäfen in Nord- und Südamerika, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].



Abbildung 4-13: Sekundär-Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].

#### Sekundär-Hub-Flughäfen (Secondary Hub Airports), FHK 7

Die Klasse der *Sekundär-Hub-Flughäfen* wird durch Vertreter aus Nordamerika dominiert (siehe Abbildung 4-13). 12 von 15 Flughäfen werden dort verortet. Vertreter sind unter anderem die Flughäfen *San Francisco* (SFO) oder *Las Vegas McCarran* (LAS). Im Vergleich zu den internationalen Flughäfen steigern sich die jährlichen Flugbewegungen auf 358 000 Starts bzw. Landungen und der Frachtumsatz auf 324 000 Tonnen. Obwohl über 30 Mio. Passagiere diese Flughäfen jährlich nutzen, wird nur ein Erlös von 12,29 US\$ pro Passagier erzielt (vgl. Tabelle 4-4, Zeile 7). In der Folge werden auch nur 446 Mio. US\$ Erlös erzielt, weniger als die *Internationalen Flughäfen*. Dies kann unter anderem an höheren Betriebskosten der Infrastruktur liegen. *Sekundäre Hub-Flughäfen* unterhalten durchschnittlich 4, überwiegend unabhängig voneinander betriebene SLB. Ein weiteres typisches Merkmal der *Sekundär-Hub-Flughäfen* ist die hohe Anzahl an Umsteigern. 45 % der Passagiere nutzen diese Flughäfen allein zum Umsteigen. Der Verkehrsmix entspricht mit 14 % *Heavy*-Flugzeugen und 85 % *Medium*-Flugzeugen mehr oder weniger exakt der Verteilung der *Internationalen Flughäfen*. Ebenfalls die Distanz zum Stadtzentrum ist gleich (ca. 21 km).

### Internationale Hub-Flughäfen (International Hubs), FHK 5

Eine maßgebliche Bedeutung als Drehkreuze innerhalb des globalen LTS nehmen die *Internationalen Hub-Flughäfen* ein. Dies zeigt sich einerseits am hohen Verkehrsanteil von Flugzeugen der Klasse *Heavy*, welcher bei 37 % liegt, und andererseits am Anteil von Umsteigepassagieren, nämlich 28 %. Jedoch fällt letzterer deutlich geringer im Vergleich zu den *Sekundär-Hub-Flughäfen* (45 % Umsteigepassagiere) aus. Der Grund liegt in der Tatsache, dass die asiatischen Vertreter der *Internationalen-Hub-Flughäfen* oft Start- bzw. Endpunkt von Passagierreisen darstellen und typischerweise unter 10 % Umsteigepassagiere<sup>111</sup> aufweisen. Im Vergleich dazu hat der Flughafen *Frankfurt/Main* (FRA) ein Anteil an Umsteigepassagieren von 50 %. Ein weiteres, typisches Merkmal von *Internationalen Hub-Flughäfen* ist, dass bis auf den Flughafen *Istanbul-Atatürk* (IST) alle Vertreter dieser Klasse vom derzeit größten Verkehrsflugzeug, der Airbus A380, angeflogen werden (Anteil *Super-Heavy* von 1 %).

Betrieblich ergibt sich ein jährliches Volumen von knapp 54,7 Mio. Passagieren und 406 000 Flugbewegungen. Zweites Standbein dieser Flughäfen ist die Fracht mit einem Umschlagsvolumen von über 1,6 Mio. Tonnen pro Jahr, welches vor allem auf mitgeführte Fracht in den Passagierflugzeugen (*Belly Freight*) zurückgeführt werden kann. Die Infrastruktur besteht im Durchschnitt aus 3 SLB (weniger als bei den *Sekundär-Hub-Flughäfen*, (vgl. Tabelle 4-3, Zeilen 5 und 7), wobei ein unabhängiges Parallelbahnsystem die Regel ist. Die Terminalfläche beläuft sich durchschnittlich auf 845 000 m<sup>2</sup>. Auch betriebswirtschaftlich gesehen, sind die *Internationalen Hub-Flughäfen* die *Top-Player* unter den Flughäfen. Der Erlös pro Passagier liegt bei überdurchschnittlichen 26,65 US\$, so dass ein Gesamterlös von fast 1,4 Mrd. US\$ pro Jahr erzielt wird, mit Abstand der beste Wert der Klassifizierung. Die Entfernung zum jeweiligen Stadtzentrum beträgt durchschnittlich 29 km. Abbildung 4-14 zeigt die 15 Vertreter dieser Klasse, unter anderem die europäischen Drehkreuze *Frankfurt/Main* (FRA), *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) und *London Heathrow* (LHR).



**Abbildung 4-14: Internationale Hub-Flughäfen,**  
**angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].**

<sup>111</sup> Guangzhou Baiyun Airport (CAN): 10 %, Tokio Haneda International Airport (HND): 4 %, Beijing Capital International Airport (PEK): 8 %.

### Hochfrequenz-Hub-Flughäfen (High Frequency Hubs), FHK 6

Diese Flughafenklasse spiegelt typische US-amerikanische Großflughäfen wider, hier als *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* bezeichnet. Einerseits liegt die Anzahl der Flugbewegungen bei 762 000 pro Jahr (vgl. Tabelle 4-3, Zeile 6), mit deutlichem Abstand der größte Wert aller Klassen. Andererseits ist mit nur 11 % ein niedrigerer Anteil an *Heavy*-Flugzeugen zu beobachten. Die hohe Anzahl an Flugbewegungen kann durch Bahnsysteme mit durchschnittlich 6 SLB bewältigt werden, welche eine Abfertigung von jährlich über 65,5 Mio. Passagieren ermöglicht. Durch die hohe Frequenz an Flugbewegungen ergibt sich demzufolge eine Vielzahl an Umsteigemöglichkeiten für die Passagiere, ersichtlich an der höchsten Umsteigerate aller Klassen von 53 %. Die durchschnittlich abgefertigte Fracht liegt bei 760 000 Tonnen pro Jahr. Jedoch wird nur ein Erlös von 9,26 US\$ pro Passagier erwirtschaftet, der niedrigste Wert aller Klassen. Der Jahreserlös liegt mit 564 Mio. US\$ nur im Mittelfeld verglichen mit den anderen Flughafenklassen. Die *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* Flughäfen liegen mit 31 km am weitesten vom Stadtzentrum entfernt.

Nur vier Flughäfen gehören dieser Klasse an, wie Abbildung 4-15 zeigt: *Atlanta Hartsfield-Jackson* (ATL), *Chicago O'Hare* (ORD), *Dallas/Fort Worth* (DFW) und *Denver* (DEN).



Abbildung 4-15: Hochfrequenz-Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].

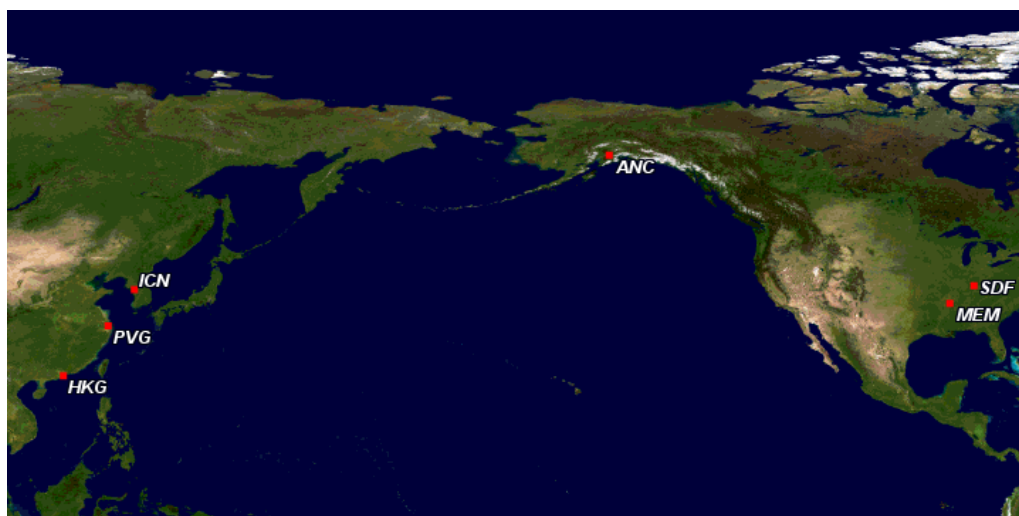


Abbildung 4-16: Fracht-Hub-Flughäfen, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code, Quelle: [155].



### Fracht-Hub-Flughäfen (Freight Hubs), FHK 4

Die letzte Flughafenklasse zeichnet sich durch einen jährlichen Frachturnschlag von 3,1 Mio. Tonnen (vgl. Tabelle 4-3, Zeile 4) aus und wird demnach mit *Fracht-Hub Flughäfen* betitelt. Weiterhin werden durchschnittlich 26,2 Mio. Passagiere mit 260 000 Flugbewegungen abgefertigt. Jedoch kann bei näherer Betrachtung eine Zweiteilung festgestellt werden. Die drei asiatischen Flughäfen *Hong Kong Chek Lap Kok* (HKG), *Seoul Incheon* (ICN) und *Shanghai Pudong* (PVG) sind nicht nur *Fracht-Hub-Flughäfen*, sondern auch klassische Passagierdrehkreuze (durchschnittlich 47 Mio. Passagiere pro Jahr). Dadurch kommt auch der hohe Anteil an Umsteigepassagieren von 21 % zu Stande. Die restlichen drei, in Nordamerika gelegenen Flughäfen dieser Klasse, *Anchorage* (ANC), *Memphis* (MEM) und *Louisville* (SDF), sind nahezu reine Frachtflughäfen und beheimaten Basen von *Integrator*-Fracht-Dienstleistern im Fall der beiden letztgenannten Flughäfen. Pro Passagier werden 22,16 US\$ erwirtschaftet. Aufgrund von Erlösen, die durch das Frachtgeschäft erzielt werden, ergibt sich ein jährlicher Gesamterlös von 668 Mio. US\$, der zweite Rang hinter den *Internationalen Hub-Flughäfen*. Infrastrukturell können diese Flughäfen auf durchschnittlich 3 SLB und ein unabhängiges Parallelbahnsystem zurückgreifen. Weiterhin wirkt sich das Frachtgeschäft auf einen hohen Anteil an *Heavy*-Flugzeugen (27 %) aus. Abbildung 4-16 veranschaulicht die geografische Verteilung der *Fracht-Hub-Flughäfen*.

#### 4.2.6 Sensitivität der Klassifizierung

Die durchgeführte Klassifizierung von Flughäfen spiegelt eine Zeitpunktbetrachtung wider. Die Ausprägung der Merkmale jedes einzelnen Flughafens verändert sich aber stetig, wobei sich bestimmte Merkmale dynamischer entwickeln im Vergleich zu anderen. Auf der einen Seite unterliegen betriebliche Merkmale, wie das Passagier- oder Flugbewegungsaufkommen, einem ständigen Wachstum bzw. Rückgang. Auf der anderen Seite verändern sich infrastrukturelle Merkmale über einen längeren Zeitraum gar nicht und falls doch, treten die Veränderungen sprunghaft auf. Im Folgenden wird ein beispielhaftes Szenario untersucht, um die Sensitivität von potenziellen Veränderungen auf die Klassen bzw. deren Merkmale zu untersuchen.

Das Szenario geht davon aus, dass die Anzahl der SLB des Flughafens *Frankfurt/Main* und des Flughafens *München* um jeweils eins erhöht. Für den Flughafen *Frankfurt/Main* wurde diese Ausbaumaßnahme bereits umgesetzt<sup>112</sup> [156] und auch über den Bau der 3. SLB am Flughafen *München* wird diskutiert.

Durch die Anpassung der Anzahl der SLB am Flughafen *Frankfurt/Main* ändert sich an dessen Zuordnung zur Klasse der *Internationale Hub-Flughäfen* nichts. Auch eine Erweiterung auf 5 SLB und eine gleichzeitige Erhöhung der Flugbewegungen um den Faktor 1,4 würden keine Veränderung in der Zuordnung nach sich ziehen.

Beim Flughafen *München* verhält es sich anders. Dieser würde durch den Neubau einer 3. SLB von der Klasse der *Internationalen Flughäfen* (FH-Klasse 1) in die Klasse der *Sekundär-Hub-Flughäfen* (FH-Klasse 7) wechseln, was aber nicht unerwartet ist. Der Flughafen *München* wird bereits bei der oben im Detail erläuterten Klassifizierung (vgl. Kapitel 4.2.5) zunächst der FH-Klasse 7 zugeordnet, wenn ausschließlich die Ergebnisse des Clusteralgorithmus betrachtet werden. Jedoch besitzt der Flughafen *München* hier einen negativen Silhouettenwert, das heißt,

---

<sup>112</sup> Der für die Arbeit genutzte Datensatz umfasst noch 3 SLB für den Flughafen *Frankfurt/Main*.

der Flughafen ist seinem Nachbarcluster ähnlicher als dem eigentlich zugeordneten Cluster (siehe Kapitel 3.2.5). Deshalb wurde der Flughafen *München* nach der Silhouettenoptimierung der Klasse der *Internationalen Flughäfen* zugeordnet. Jedoch beträgt der Silhouettenwert -0,03, so dass der Flughafen *München* zwischen zwei Clustern liegt und nicht eindeutig einem Cluster zuzuordnen ist<sup>113</sup>. Ähnlich zur Erweiterung bestehender Flughäfen ist die Aufnahme von Flughafenneubauten in die Stichprobe, die in Kapitel 4.2.7 diskutiert wird.

Wenn jedoch andere Merkmale als Cluster-bildend gewählt werden, ist es wahrscheinlich, dass sich entweder neuartige Klassen herausbilden oder sich die Zuordnung der einzelnen Flughäfen zu den Klassen deutlich verändert. Die Auswirkung der Einbeziehung von betriebswirtschaftlichen bzw. Effizienzmerkmalen wird in Kapitel 5.2 näher diskutiert.

#### 4.2.7 Zuordnung von neuen Flughäfen zur Klassifizierung

Die relevanten Flughäfen mit Auswirkung auf das globale LTS bilden bereits die Stichprobe für die oben durchgeführte Clusteranalyse. Alle existierenden Flughäfen in die Stichprobe aufzunehmen respektive eine zufällige (dadurch aber repräsentative) Wahl aus der Grundgesamtheit zu treffen, wäre nicht zielführend (siehe Kapitel 4.2.2). Nur für das LTS relevante Neubauten von Flughäfen müssten ggf. in die Stichprobe aufgenommen werden und entsprechend einer der Klassen zugeordnet werden.

Eine Möglichkeit diese Zuordnung umzusetzen ist, den Datensatz des neuen Flughafens dem Stichprobenumfang hinzuzufügen und die Clusteranalyse erneut durchzuführen. Somit wird auf Basis aller Merkmale des Flughafens die Zuordnung zu einer Klasse vorgenommen. Durch die Hinzunahme eines neuen Objektes unter Verwendung der gleichen Cluster-bildenden Merkmale sind Veränderungen in begrenztem Umfang bei den Merkmalen der Flughafenklassen zu erwarten. Bei der Aufnahme eines neuen Flughafens zur jetzigen Stichprobe ist jedoch das Alter der Daten zu berücksichtigen. Die erhobenen Daten stammen aus dem Jahr 2012, so dass ein zeitlicher Unterschied von ca. 7 Jahren zu berücksichtigen ist, in denen sich auch die Flughäfen der Stichprobe weiterentwickelt haben. Daher müssen die Merkmale, die im Zeitverlauf typischerweise anwachsen, auf das Jahr 2012 zurückgerechnet werden.

Beispielsweise wird ein neuer Flughafen in *Peking-Daxing (Beijing New International Airport)* gebaut, der voraussichtlich im Juni 2019 in Betrieb gehen soll [38], [39] und sofort eine Bedeutung im LTS spielen wird. Anfänglich werden bis zu 45 Mio. Passagiere pro Jahr am neuen Flughafen erwartet, der zunächst exklusiv durch Mitglieder der Luftfahrtallianz *SkyTeam*<sup>114</sup> genutzt werden soll. 4 SLB werden zur Eröffnung am Flughafen *Peking-Daxing* zur Verfügung stehen, die bis zu 650 000 Flugbewegungen (im Endausbauzustand) abfertigen können [157].

Da der Flughafen *Peking-Daxing* noch nicht eröffnet ist, stehen (aktuelle) Daten nicht zur Verfügung. Weiterhin sind in der Literatur nicht für alle Cluster-bildenden Merkmale Prognosen genannt und müssen somit abgeschätzt werden. Für 2019 werden 45 Mio. Passagiere erwartet, die, bei einem durchschnittlich gewachsenen Passagieraufkommen von 4,9 % über die vergangenen Jahre, ca. 32 Mio. Passagieren im Jahr 2012 entsprechen. Das Aufkommen an Um-

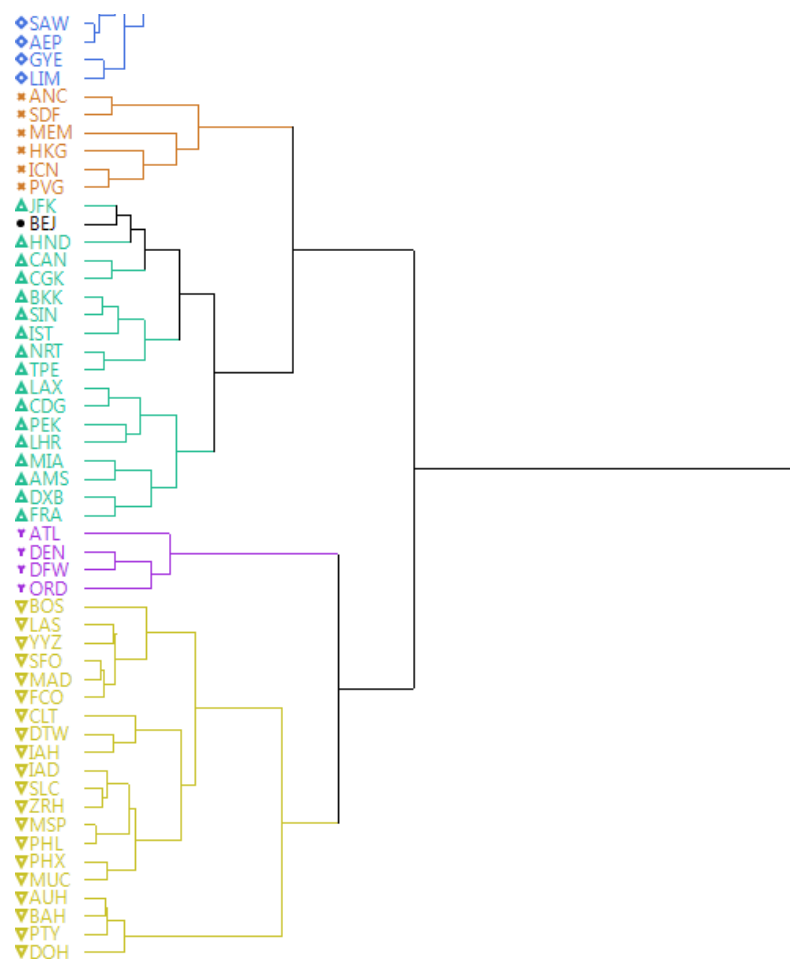
---

<sup>113</sup> Aus Konsistenzgründen wurden aber alle Flughäfen mit negativem Silhouettenwert dem (ähnlicheren) Nachbarcluster zugeordnet.

<sup>114</sup> Hierzu zählen *China Southern Airlines*, die größte chinesische Fluggesellschaft und *China Southern Airlines*, drittgrößte chinesische Fluggesellschaft.

steigern wird vom Autor mit 10 % angenommen, da auch der *Beijing Capital International Airport* (PEK) kein typischer Umsteigeflughafen ist und nur mit einem Anteil von 8 % an Umsteigepassagieren in die ursprüngliche Clusteranalyse einfließt. Die Flugbewegungen werden mit 310 000 pro Jahr<sup>115</sup> und das Frachtvolumen mit 1 Mio. Tonnen pro Jahr abgeschätzt. Da noch kein IATA 3-Letter-Code für den Flughafen *Peking-Daxing* festgelegt ist, wird er in dieser Arbeit mit BEJ bezeichnet. Auswirkungen auf den derzeitigen *Beijing Capital International Airport* (PEK) sind schwer abzuschätzen.

Abbildung 4-17 zeigt, dass der Flughafen *Peking-Daxing* (BEJ) den *Internationalen Hub-Flughäfen* (mintgrün eingefärbt) zugeordnet wird. Dadurch verändern sich natürlich die durchschnittlichen, quantitativen Ausprägungen der einzelnen Merkmale und schlussendlich auch die des Flughafenrepräsentanten für diese Flughafenklasse. In Tabelle 4-5 werden die Veränderungen für die Klasse *Internationale Hub-Flughäfen* gegenübergestellt. Das durchschnittliche Passagieraufkommen pro Jahr reduziert sich um ca. 1,4 Mio. Passagiere, das Flugbewegungsaufkommen sinkt um ca. 8 000 Flugbewegungen und das jährliche Frachtvolumen reduziert sich um knapp 40 000 Tonnen. Der Anteil an Umsteigern und die Anzahl an SLB bleiben unverändert.



**Abbildung 4-17: Ausschnitt des Dendrogramm zur Clusteranalyse mit BEJ, x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA 3-Letter-Code der FH, vor der Silhouettenoptimierung.**

<sup>115</sup> Bei einem Aufkommen 45 Mio. Passagieren pro Jahr entspricht dies 110 Passagieren pro Flugbewegung (FRA: 108 PAX/FB).

**Tabelle 4-5: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Merkmale pro Flughafenklasse, die in die Clusteranalyse einfließen, Clusteranalyse mit BEJ, gerundet, 2012**

FH-Kl.	#	Name	Passagiere [PAX/Jahr]	Flug- bewegungen [FB/Jahr]	Fracht [Tonnen/ Jahr]	Um- steiger [%]	# SLB
5	15	<i>Internationale Hub-FH ohne BEJ</i>	54 690 000 (±12 606 000)	406 000 (±96 000)	1 635 000 (±402 000)	28,0 (±14,0)	3 (±1,03)
5	16	<i>Internationale Hub-FH mit BEJ</i>	53 272 000 (±13 434 000)	398 000 (±97 000)	1 596 000 (±419 000)	27,0 (±14,3)	3 (±1,03)

Das oben aufgeführte Beispiel zeigt, dass bei Hinzunahme neuer Flughäfen sich die Merkmalsausprägungen einer Klasse in begrenztem Umfang verändern. Es besteht aber die Möglichkeit, dass sich durch die Eröffnung weiterer Flughäfen<sup>116</sup> und die unterschiedliche weltweite Entwicklung des Flugverkehrs die Klassen respektive die Zuordnung der Flughäfen zu den Klassen zukünftig (in 10 Jahren) stärker verändern können.

#### 4.2.8 Diskussion und Zusammenfassung

Obwohl die Silhouettenkoeffizienten teilweise nur durchschnittliche Cluster-interne Homogenitätsstrukturen aufzeigen, resultiert die Clusteranalyse mit den gewählten Merkmalen in einer repräsentativen und handhabbaren Klasseneinteilung, die ebenso neuartige Klassen im Vergleich zu bisherigen Klassifizierungen von Flughäfen aufzeigt. Hervorzuheben ist dabei Cluster 6, die *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen*. Mit typischerweise mehr als 6 SLB kann eine hohe Anzahl an Flugbewegungen abgefertigt werden, was die Rolle als Drehkreuz für den Passagierverkehr prädestiniert. Diesen Fakt unterstreicht ebenso ein Anteil an Umsteigern von über 50 %.

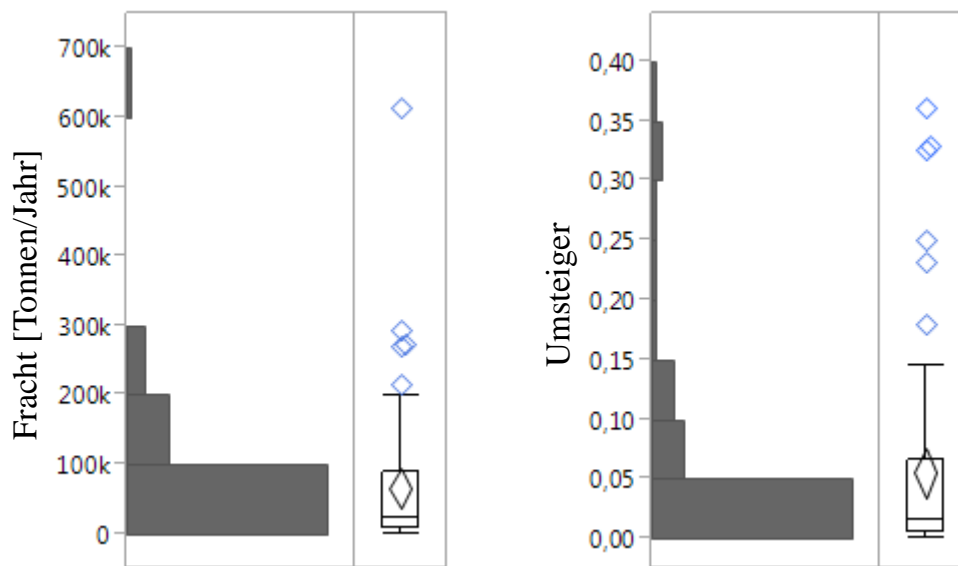
Weiterhin markant sind die *Fracht-Hub-Flughäfen*, die einen Zusammenschluss aus drei asiatischen Wirtschafts- und Geschäftsmetropolen, zwei US-amerikanischen Integrator-Drehkreuzen und dem Flughafen *Anchorage* (ANC), gelegen auf mittlerem Wege zwischen Nordamerika und Asien, darstellen. Die amerikanischen Vertreter *Memphis* (MEM), *Louisville* (SFD) und *Anchorage* (ANC) können als reine Frachtflughäfen bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu sind *Hongkong Chek Lap Kok* (HKG), *Shanghai Pudong* (PVG) und *Seoul Incheon* (ICN) gleichzeitig wichtige Passagierknotenpunkte Südasiens (vgl. Abbildung 4-19, rechts).

Dieser Punkt begründet auch die teilweise hohen Standardabweichungen einiger Werte, welche die oben genannte schwache Homogenitätsstruktur der Cluster zur Folge haben. Da fünf Merkmale in die Clusteranalyse einfließen, sind ein bis zwei davon die prägenden Merkmale des Clusters. Bei den verbliebenen Merkmalen ist bei Betrachtung der Histogramme und Box-Plots zu erkennen, dass Ausreißer auftreten können (siehe Abbildung 4-18) oder die Streuung des Merkmals innerhalb des Clusters überdurchschnittlich groß ausfällt (siehe Abbildung 4-19). Hohe Standardabweichungen können die Folge sein (vgl. Tabelle 4-3). Dennoch prägen sich auch bei den ergänzenden, zur Beschreibung der Klassen dienenden Merkmalen (vgl. Tabelle 4-4) prägnante Ergebnisse heraus. Der Erlös pro Passagier ist z. B. bei den *Hochfrequenz-Hub-*

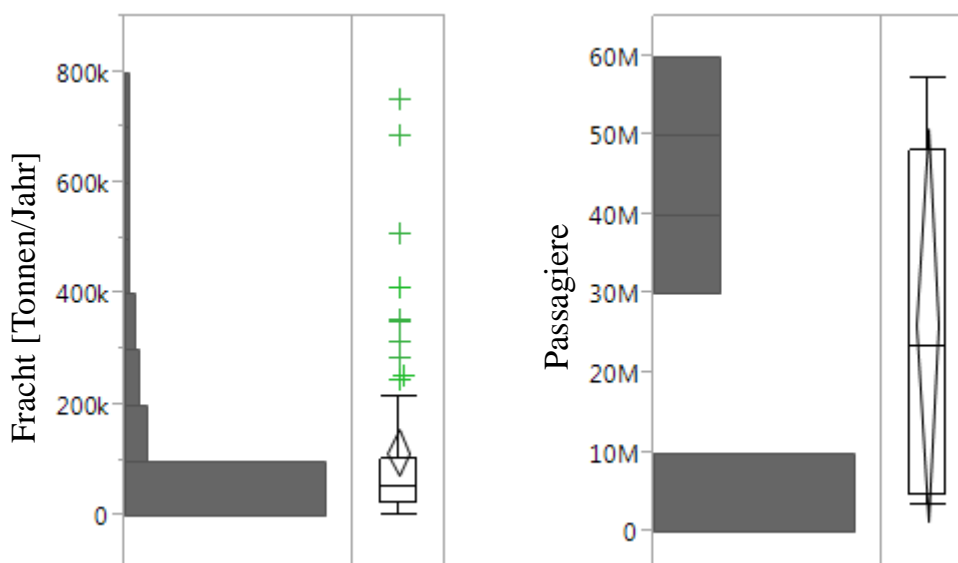
<sup>116</sup> China plant bis 2025 weitere 124 neue Flughäfen zu bauen [39].

*Flughäfen* deutlich geringer im Vergleich zu den *Internationalen Hub-Flughäfen*. Auch die Distanz zum Stadtzentrum stieg mit zunehmender Größe des Flughafens an.

Die beiden Klassen der *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* und *Internationalen Hub-Flughäfen* zeigen gut auf, warum sowohl die Passagiere pro Jahr als auch die Flugbewegungen pro Jahr in die Clusteranalyse einfließen, obwohl beide Merkmale eine hohe Korrelation untereinander aufweisen. *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* verfolgen die Strategie mit möglichst vielen Flugbewegungen eine hohe Anzahl an Passagieren abzufertigen. Durchschnittlich ist ein LFZ mit nur 85 Passagieren besetzt. Dagegen ist das jährliche Passagieraufkommen der *Internationalen Hub-Flughäfen* vergleichbar, aber die Anzahl der Flugbewegungen deutlich niedriger. 134 Passagiere werden im Durchschnitt pro Flug an *Internationalen Hub-Flughäfen* transportiert.



**Abbildung 4-18: Histogramm & Box-Plot der Kleinen Regionalflughäfen;  
Links: Fracht [Tonnen/Jahr], Rechts: Anteil der Umsteiger.**



**Abbildung 4-19: Histogramm & Box Plot; Links: Fracht [Tonnen/Jahr] der Großen Regionalflughäfen, Rechts: Passagiere [PAX] der Fracht-Hub-Flughäfen.**

Bei genauer Betrachtung der Repräsentanten einzelner Cluster fallen ein paar Besonderheiten ins Auge. Beispielsweise erfolgt die Zuordnung der Flughäfen *München* (MUC), *Zürich* (ZRH) und *Rom Fiumicino* (FCO) zur Klasse der *Internationale Flughäfen*. Subjektiv betrachtet, wäre eine Zuordnung zur Klasse der *Sekundär-Hub-Flughäfen* ebenso sinnvoll, da die beiden erstgenannten Flughäfen sekundäre *Hub-Flughäfen* von *Lufthansa* sind und *Rom Fiumicino* (FCO) das Drehkreuz von *Alitalia* darstellt. Vor der Silhouettenoptimierung sind diese Flughäfen der Klasse der *Sekundär-Hub-Flughäfen* zugeordnet. Jedoch ergeben sich marginal negative Silhouettenwerte. Diese beziffern sich auf -0,03 bei FCO und MUC sowie -0,14 bei ZRH. Das heißt, mathematisch gesehen ist eine Neuordnung sinnvoll, da sich hierdurch der Silhouettenkoeffizient beider Cluster und ebenso der Silhouettenkoeffizient über alle Cluster verbessert. Wenn sich die Werte der genannten Flughäfen nur leicht in Richtung der *Sekundär-Hub-Flughäfen* verschiebt<sup>117</sup>, wird eine Zuordnung zu diesen gefestigt.

Des Weiteren ist es nicht zielführend, die Anzahl der Flughäfen, die betrachtet werden, zu erhöhen, da dies nur zu einer Erhöhung der Elementanzahl der „kleineren“ Klassen führen würde. Bereits in der hier verwendeten Stichprobe fallen über 60 % der Flughäfen in regionale Klassen. Der größte Teil des weltweiten Passagierverkehrs konzentriert sich auf ein paar dutzend Flughäfen. Die 241 Flughäfen der Stichprobe decken ca. 61 % aller weltweit abfliegenden Passagiere ab (Stand: 2012, [7]). Hierauf ist der Fokus zu legen, um Flughäfen im globalen LTS abzubilden. Einzig Flughäfen in aufstrebenden Märkten wie China, Indien oder auch in Südamerika müssen bei entsprechender Größe zu einem späteren Zeitpunkt zusätzlich berücksichtigt werden.

Zur Verifizierung der Lösung mit 7 Klassen werden weitere naheliegende Lösungen betrachtet. Bei einer Erhöhung der Clusteranzahl auf acht würde sich ein weiterer kleiner Cluster mit vier Elementen von der Klasse der *Sekundär-Hub-Flughäfen* abspalten<sup>118</sup>, welcher die Flughäfen *Abu Dhabi* (AUH), *Doha* (DOH), *Bahrain* (BAH) und *Tocumen* (PTY) umfassen würde. Diese Flughäfen haben einen hohen Anteil von Umsteigepassagieren (durchschnittlich 62 %) im Vergleich zu den restlichen Flughäfen der *Sekundär-Hub-Flughäfen* Klasse. Bei einer Lösung mit sechs Klassen würden die *Fracht-Hub-Flughäfen* mit den *Internationalen Hub-Flughäfen* fusionieren.

Die beiden hier diskutierten Varianten sind nach Meinung des Autors schlechter als die Lösung mit sieben Klassen. Die Lösung mit acht Klassen ergäbe erneut eine kleine Klasse mit nur vier Einzelflughäfen, wobei diese sich nur durch den hohen Anteil von Umsteigepassagieren hervorheben. Die Lösung mit sechs Klassen wäre bezüglich der Ausprägung des Merkmals *Fracht* kritisch zu betrachten, da die sechs *Fracht-Hub-Flughäfen* deutlich höhere Volumina an *Fracht* abfertigen. Dieses Merkmal prägt diese Flughäfen und ist ein eigenständiger Geschäftsbereich, der sie von anderen Flughäfen differenziert. Ebenso sind die Merkmale *Passagiere pro Jahr* und *Flugbewegungen pro Jahr* bei den *Fracht-Hub-Flughäfen* durchschnittlich weniger stark ausgeprägt im Vergleich zu den *Internationalen Hub-Flughäfen*, was aber in erster Linie an den drei US-amerikanischen Vertretern liegt.

Zusammenfassend zeigt sich die Plausibilität der Merkmalsauswahl. Die Clusteranalyse resultiert in der Abbildung geläufiger Geschäftsmodelle von Flughäfen. Jedoch ergänzen spezifische Differenzierungen von Geschäftsmodellen wie *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* und

<sup>117</sup> Z. B. der Bau der 3. SLB am Flughafen *München* (MUC, vgl. Kapitel 4.2.6) oder höhere Werte der Passagier-, Flugbewegungs- oder Umsteiger-Zahlen.

<sup>118</sup> Bei Betrachtung des Dendrogramms in Anhang C wird dies deutlich.

*Fracht-Hub-Flughäfen* die Flughafenlandschaft. Die Ergebnisse zeigen eine rein datenbasierte Modellierung von Flughafenklassen, ohne dabei auf feste Schwellenwerte oder allein auf das Passagiervolumen der Flughäfen pro Jahr, wie oft bei anderen verbreiteten Klassifizierungen (siehe Kapitel 4.2.1) genutzt, zurückzugreifen. Weiterhin ist im Vergleich mit den in Kapitel 3.2.6 genannten Ansätzen in dieser Arbeit eine globale Sichtweise gegeben.

### 4.3 Definition von Fluggesellschaftsklassen

Im vorherigen Kapitel lag der Fokus auf den Flughäfen. Jedoch stellt sich nun die Frage, wie werden die modellierten Flughafenklassen durch Fluggesellschaften bedient? Hierfür ist es ebenfalls sinnvoll, Klassen von Fluggesellschaften zu modellieren und damit Fluggesellschaftsklassen (FGK) zu definieren. Das Vorgehen entspricht dem in Kapitel 3.2.2 bis Kapitel 3.2.5 und wird im Folgenden auf Fluggesellschaften angewendet. In Kapitel 4.3.1 wird auf die Grundgesamtheit und die Stichprobe näher eingegangen. Anschließend erfolgt die Auswahl geeigneter Merkmale, die für die Clusteranalyse genutzt werden. Kapitel 4.3.3 widmet sich der Clusteranalyse an sich, das heißt, die Wahl des Fusionsalgorithmus, die Bestimmung der Clusteranzahl und die Bewertung der Clusteranalyse mittels verschiedener Techniken werden erläutert. Die modellierten Fluggesellschaftsklassen werden im Anschluss daran beschrieben (Kapitel 4.3.4). Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse (Kapitel 4.3.5) und der Einbindung der Fluggesellschaftsklassen zur Beschreibung der Merkmale von Flughafenklassen (Kapitel 4.3.6).

#### 4.3.1 Grundgesamtheit und Stichprobe

Bei Betrachtung aller weltweiten Segmentverbindungen im Jahr 2010 wurden diese von knapp 1 150 Fluggesellschaften bedient [7]. Neben diesen Fluggesellschaften gibt es weitere Fluggesellschaften, die kommerzielle Flüge durchführen, aber nicht durch die GDS erfasst respektive auf Basis anderer Quellen nicht zur Datenbank ergänzt werden. Hierunter fallen u. a. Charterfluggesellschaften, die keinen Linienbetrieb anbieten, wie beispielsweise *Air Hamburg* oder *Rhein-Neckar Air (MHS Aviation)*. Ähnlich zu den Flughäfen ist somit die Grundgesamtheit für die Stichprobe zur Modellierung der Fluggesellschaftsklassen schwierig zu bestimmen.

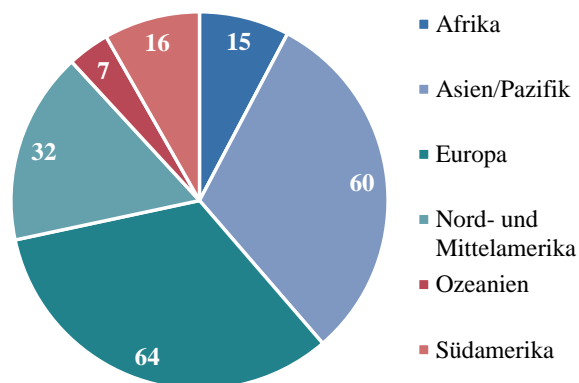


Abbildung 4-20: Geografische Verteilung der Fluggesellschaften.

Schließlich bilden 194 Fluggesellschaften aus dem Jahr 2010 die Grundlage für die Modellierung der Fluggesellschaftsklassen, die jedoch 75 % des weltweiten Passagervolumens abdecken [7], [158]. Aus den gleichen Gründen, die in Kapitel 4.2.2 ausgeführt werden, findet auch hier keine Zufallsauswahl der Stichprobenelemente statt. Die geografische Verteilung der Fluggesellschaften zeigt Abbildung 4-20. Jeweils ein Drittel der Fluggesellschaften sind im asiatisch/pazifischen Raum bzw. in Europa beheimatet. 32 Fluggesellschaften haben ihren Sitz in Nord- und Mittelamerika, 15 in Afrika, 16 in Südamerika und 7 in Ozeanien.

#### 4.3.2 Auswahl der Merkmale

**Tabelle 4-6: Kategorisierte, verfügbare Merkmale von Fluggesellschaften; hellgrau: als maßgebend erachtete Merkmale; dunkelgrau: ausgewählte Merkmale, die in die Clusteranalyse einfließen.**

Größe	Flotte	Markt	Effizienz
Passagiere [PAX/Jahr]	Anzahl an Luftfahrzeugen	Anzahl an Flughäfen	Passagierladefaktor (PLF) <sup>119</sup> [%]
Fracht [Tonnen/Jahr]	LFZ-Kilometer [km]	Anzahl an OD-Märkten <sup>120</sup>	Gewichtsladefaktor (GLF) [%]
Ø transportierte Passagiere [PAX]	LFZ-Flugstunden [h]	Netzwerk-Direktheit	Erlös/Passagierkilometer (US\$/Pkm)
Ø transportierte Fracht [Tonnen]	Anzahl an Sitzen	Markt-Dichte	Erlös [US\$]
Passagierkilometer [Pkm] <sup>121</sup>	LFZ-Abflüge [FB]	Ø Flugdistanz [km]	Erlös/Passagier [US\$/PAX]
Tonnenkilometer [Tkm], PAX + Fracht	Sitzplatzkilometer verfügbar [Skkm] <sup>122</sup>	Anzahl an Segmenten	Erlös/Kilometer [US\$/km]
	Tonnenkilometer verfügbar [Tkm], PAX + Fracht	Passagier-Direktheit <sup>123</sup>	
	Ø Anzahl an Sitzen	Segment-Dichte <sup>124</sup>	
		Segment-Gini <sup>125</sup>	
		Markt-Gini <sup>126</sup>	

<sup>119</sup> Englisch: *Seat Load Factor* (SLF).

<sup>120</sup> Ein OD-Markt entspricht dem Angebot und der Nachfrage zwischen zwei Flughäfen.

<sup>121</sup> Englisch: *Revenue Passenger Kilometer* (RPK).

<sup>122</sup> Englisch: *Available Seat Kilometer* (ASK).

<sup>123</sup> Die Passagier-Direktheit ist der Quotient aus der Summe aller Segment-Passagiere und der Summe aller OD-Passagiere und spiegelt somit die durchschnittliche Anzahl der Flüge eines Passagiers pro Reise wider [159].

<sup>124</sup> Die Segment-Dichte ist ähnlich der Markt-Dichte, nur werden statt der OD-Märkte die Segmente betrachtet (siehe Formel (4.2)) [159].

<sup>125</sup> Spiegelt die Zentralität des Netzwerks wider [159].

<sup>126</sup> Gleich-/Ungleichverteilung der OD-Märkte. Der Markt-Gini ist gleich eins, wenn alle Passagiere auf nur einem OD-Markt fliegen würden (maximale Ungleichheit) [159].



Die verfügbaren Merkmale der Fluggesellschaften sind in Tabelle 4-6 aufgeführt, welche in vier individuelle Kategorien eingeteilt werden, die eine Fluggesellschaft prägen: *Größe*, *Flotte*, *Markt* und *Effizienz*. Die im Folgenden stattfindende Auswahl der Merkmale, die später in die Clusteranalyse einfließen, erfolgt analog den Ausführungen in Kapitel 3.2.1. Detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Merkmalen von Fluggesellschaften sind im Anhang D zu finden.

In der Kategorie Größe werden die Merkmale (transportierte) *Passagiere* und *Fracht pro Jahr* als maßgeblich erachtet, da beide Auswirkung auf die Höhe der Erlöse einer Fluggesellschaft haben. Auch wenn das vordringliche Produkt einer Fluggesellschaft überwiegend der Transport-service für Passagiere ist, wird hier das Merkmal *Fracht pro Jahr* in die Clusteranalyse eingebunden, weil dieser einen entscheidenden Unterschied zwischen verschiedenen Geschäftsmodellen von Fluggesellschaften ausmacht. Im weiteren Verlauf wird sich zeigen, dass das Merkmal Passagiere dennoch ausgeprägt zwischen den Fluggesellschaftsklassen ist. Der Korrelationskoeffizient zwischen beiden Merkmalen beträgt 0,44 (siehe Anhang D). Aufgrund der Entscheidung, die Passagiere nicht in die Clusteranalyse einzubeziehen, werden auch nicht die *Passagierkilometer pro Jahr* herangezogen, da diese wiederum stark korrelativ (Koeffizient: 0,88) zu den Passagieren sind. Gleiches gilt für die Beziehung zwischen den Merkmalen Fracht und *Tonnenkilometer* (Koeffizient: 0,77).

Aus der zweiten Kategorie, der Flotte einer Fluggesellschaft, werden die *Anzahl der LFZ*, die *LFZ-Kilometer*, die *LFZ-Flugstunden* und die *Anzahl an Sitzen* für wichtige Eigenschaften erachtet. Alle genannten Merkmale sind hochkorrelativ untereinander, mit Koeffizienten größer als 0,93. Dementsprechend werden nur die LFZ-Flugstunden ausgewählt, da eine Hinzunahme weiterer Merkmale keine neuen Informationen liefern würde.

Die Schlüsselkategorie, die v.a. das Geschäftsmodell einer Fluggesellschaft ausmacht und beeinflusst, ist der Markt, welcher die Ausdehnung des Absatzgebiets der Flugdienstleistungen umfasst und in welcher Weise diese durch die Fluggesellschaft realisiert werden. Fünf Merkmale sind hierbei maßgeblich: die *Anzahl der Flughäfen*, die *Anzahl an Märkten*, die *Netzwerk-Direktheit* [159], die *Markt-Dichte* [159] und die *durchschnittliche Flugdistanz*. Dabei definiert sich die *Netzwerk-Direktheit* als Quotient aus der Anzahl der Segmente und der Anzahl der OD-Märkte (vgl. Formel(4.1)). Die Netzwerk-Direktheit ist gleich eins, wenn eine Fluggesellschaft nur Direktflüge anbietet. Je näher der Wert zu null tendiert, desto ausgeprägter ist das *Hub*-Verhalten einer Fluggesellschaft. Die Markt-Dichte ist der Quotient aus der Anzahl der OD-Märkte abzüglich der minimalen Anzahl der OD-Märkte<sup>127</sup> und der Anzahl der maximal möglichen OD-Märkte<sup>128</sup> abzüglich der minimalen Anzahl der OD-Märkte (siehe Formel (4.2)).

$$\text{Netzwerk} - \text{Direktheit} = \frac{\# \text{ Segmente}}{\# \text{ ODMärkte}}, [159] \quad (4.1)$$

$$\text{Markt} - \text{Dichte} = \frac{\# \text{ ODMärkte} - \min. \# \text{ ODMärkte}}{\max. \# \text{ möglicher ODMärkte} - \min. \# \text{ ODMärkte}}, [159] \quad (4.2)$$

Die Korrelationsanalyse zeigt, dass sowohl die Anzahl der Flughäfen und die Anzahl der Märkte (Koeffizient: 0,76) als auch die Markt-Dichte und die Netzwerk-Direktheit mäßig

<sup>127</sup> Minimale Anzahl der ODMärkte = (Anzahl der Knoten des Netzwerks – 1) \* 2. Da in einem Netzwerk einer Fluggesellschaft niemals 0 Märkte vorhanden sind, existiert eine untere Schranke, die sowohl im Zähler als auch im Nenner abgezogen wird.

<sup>128</sup> Maximale Anzahl der ODMärkte = Anzahl der Flughäfen \* (Anzahl der Flughäfen – 1).

miteinander korrelieren. Für die Clusteranalyse werden die Netzwerk-Direktheit und die durchschnittliche Flugdistanz als Merkmale gewählt. Die durchschnittliche Flugdistanz spiegelt dabei ein Unterscheidungsmerkmal zwischen regional und interkontinental agierenden Fluggesellschaften wider.

In der Kategorie Effizienz sind unter anderem der *Passagierladefaktor* (PLF) und *Gewichtsladefaktor* (GLF) klassische Indikatoren. Um eine einheitliche Bewertung der Effizienz zwischen FSNC und LCC zu erzielen, fließt der PLF in die Clusteranalyse ein. Die Nutzung des GLF würde zu einer falschen Interpretation der Effizienz führen, da LCC typischerweise keine Fracht transportieren, FSNC in der Regel schon. Genauso wichtige Effizienzindikatoren für Fluggesellschaften sind *Erlöse*. Jedoch kommt hier derselbe Grund zum Tragen, der bei den Flughäfen angeführt wird. Es gibt keine einheitliche Zuordnung der Fluggesellschaften von Erlösen zu bestimmten Erlösquellen. Somit werden erlösbezogene Kennzahlen nur als beschreibende Merkmale genutzt, da es sonst unweigerlich zu einer Verzerrung der Ergebnisse kommt.

### 4.3.3 Clusteranalyse II - Fluggesellschaften

Im Folgenden ist es zunächst wieder das Ziel, eine hinreichende respektive handhabbare Anzahl an funktionalen Clustern für Fluggesellschaften zu finden, wobei wiederum die wesentlichen Merkmale von Fluggesellschaften einbezogen werden und eine weltweite Abdeckung vorhanden ist. Das Vorgehen entspricht dem in Kapitel 3.2.2 bis 3.2.5 erläuterten Reihenfolge.

#### 4.3.3.1 Fusionsalgorithmus und Clusteranzahl

Wie bei den Flughäfen kommt das hierarchisch, agglomerative *Ward-Linkage* Verfahren zum Einsatz. Dieses stellte sich während der Analyse als robust und am besten geeignet für diese Stichprobe heraus (vgl. Kapitel 4.2.4.1). Auf Basis der *L method* wird analog zum Vorgehen bei den Flughäfen die Clusteranzahl bestimmt. Unter Einbindung des vollständigen Clusterverlaufs (siehe Anhang D, Tabelle 8-18) ergibt sich auch hier in erster Iteration ein minimaler  $RMSE_c$

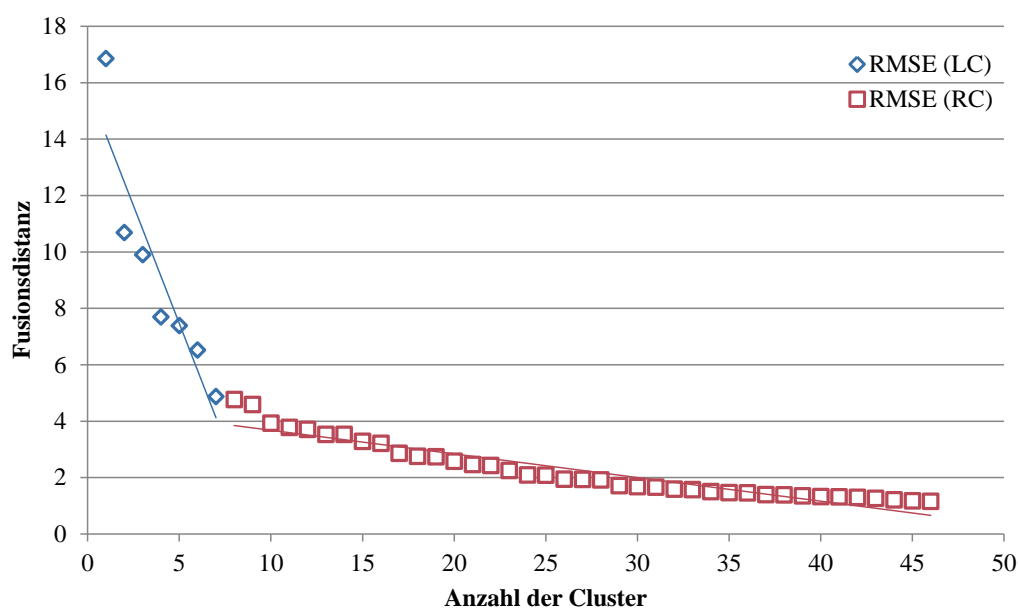


Abbildung 4-21: Auffinden der Clusteranzahl für Clusteranalyse II unter Nutzung der *L method*.

bei einer Clusteranzahl von 23. Wiederum liegt die erste Lösung über einem interpretierbaren Maß. In der zweiten Iteration werden schließlich nur noch 46 Elemente betrachtet, so dass sich der minimale  $RMSE_c$  bei einer Clusteranzahl von sieben zeigt, grafisch dargestellt in Abbildung 4-21. Das Dendrogramm der Clusteranalyse II ist in Anhang D, Abbildung 8-10 zu finden.

#### 4.3.3.2 Silhouetten

Nächster Schritt ist wiederum die Bewertung der gefundenen Lösung auf Basis der Silhouetten (vgl. Kapitel 3.2.5). Folgende Silhouetten mit einem durchschnittlichen Silhouettenkoeffizienten über alle Cluster von  $\bar{s}_c = 0,38$  [Intervall von 0,08 bis 0,67] ergeben sich nach der Clusteranalyse (vgl. Abbildung 4-22).

Cluster 2, 4, 6 und 7 zeigen ausschließlich positive Silhouettenwerte  $s(i)$ . Dabei besitzen Cluster 6 und Cluster 7 eine homogene Verteilung mit Silhouettenkoeffizienten von  $\bar{s}_6 = 0,67$  bzw.  $\bar{s}_7 = 0,60$ . Zur Verbesserung der Silhouetten werden wieder einzelne Elemente, die einen negativen Silhouettenkoeffizienten haben, dem benachbarten Cluster zugeordnet. Dieses Vorgehen führt vor allem bei Cluster 1 zu einer positiveren Silhouette (siehe Abbildung 4-23). Jedoch werden in diesem Fall nicht alle Elemente mit negativem Silhouettenkoeffizienten neu zugeordnet. Zwei Elemente des Clusters 5 (dies sind die Deutsche Lufthansa und United Airlines) sollen der Berechnung nach (Formel (3.10)) zu Cluster 6 wechseln, wobei sich die individuellen Silhouettenwerte nur leicht ins Positive verschieben würden. Dadurch würde aber  $\bar{s}_6$  deutlich sinken, und infolgedessen ebenso der Silhouettenkoeffizient über alle Cluster ( $\bar{s}_c$ ) sich im Vergleich zu vor der Optimierung verschlechtern.

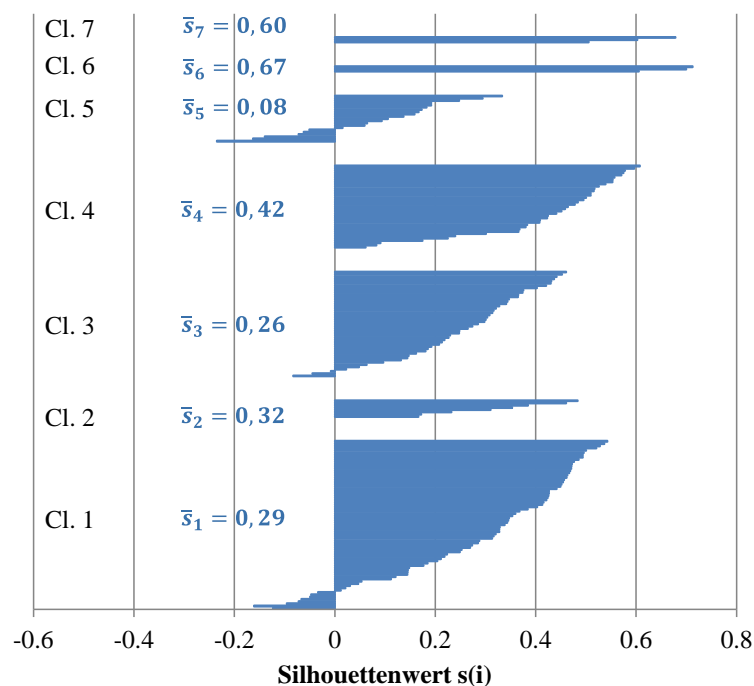


Abbildung 4-22: Silhouetten der Clusteranalyse II, vor der Optimierung.

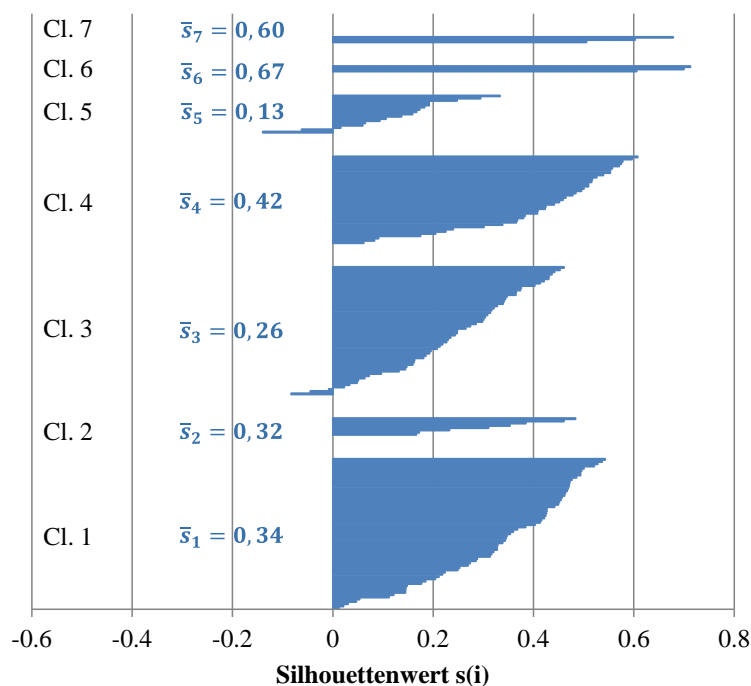


Abbildung 4-23: Silhouetten der Clusteranalyse II, nach der Optimierung.

Daher werden diese beiden Elemente nicht verschoben und verbleiben in Cluster 5. Ähnliches gilt für drei Elemente des 3. Clusters. Es zeigt sich, dass eine Verifizierung der Optimierung sinnvoll ist, da diese nicht automatisch zu einem optimalen Silhouettenkoeffizient über alle Cluster ( $\bar{s}_C$ ) führt. Nach der Optimierung ergeben sich Silhouettenkoeffizienten in einem Intervall von  $\bar{s}_5 = 0,13$  (Cluster 5) bis  $\bar{s}_6 = 0,67$  (Cluster 6) und der Silhouettenkoeffizient über alle Cluster von  $\bar{s}_C = 0,39$ .

#### 4.3.4 Klassen von Fluggesellschaften

Schließlich lassen sich auf Basis der Clusteranalyse sieben verschiedene Fluggesellschaftsklassen festlegen, die in Tabelle 4-7<sup>129</sup> aufgeführt sind. Ebenfalls werden die klassenspezifischen Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) für die jeweiligen Merkmale aufgezeigt. Hervorgehoben sind die Klassen mit dem kleinsten (hellgrau) und größten (dunkelgrau) Wert in Bezug auf das jeweilige Merkmal. Tabelle 4-8 ergänzt diese Übersicht durch weitere, die jeweiligen Klassen beschreibende Merkmale. Weitere, ausführlichere Ergebnisse (Auflistung der Flughäfen mit Clusterzugehörigkeit, Median und Quantil der einzelnen Merkmale) sind im Anhang D zu finden.

Im Folgenden werden die einzelnen Fluggesellschaftsklassen beschrieben und einzelne Vertreter aufgezeigt, wobei mit den *Regional-Fluggesellschaften* begonnen wird und die „Größe“ der Fluggesellschaften zunimmt. Abschließend wird auf die *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften* eingegangen.

<sup>129</sup> Die Nummer der Cluster dient lediglich zur Identifizierung und stellt keine Reihenfolge dieser dar.

**Tabelle 4-7: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Merkmale pro Fluggesellschaftsklasse, die in die Clusteranalyse einfließen, gerundet, 2010.**

FGK	#	Name	Fracht [Tonnen/ Jahr]	LFZ-Flug- stunden [h/Jahr]	Netzwerk- Direktheit	Ø Flug- distanz [km]	Sitzlade- faktor [%]
1	67	Kurzstrecken- Punkt-zu-Punkt-FG	35 000 (±66 000)	123 000 (±133 000)	0.80 (±0.15)	1 237 (±460)	75,22 (±5,93)
2	8	Langstrecken- Punkt-zu-Punkt-FG	29 000 (±33 000)	112 000 (±69 000)	<b>0.82</b> (±0.17)	<b>3 802</b> (±1 334)	77,46 (±8,95)
3	57	Kleine Netz-FG	90 000 (±111 000)	248 000 (±178 000)	0.33 (±0.12)	1 639 (±722)	67,60 (±6,90)
4	39	Regional-FG	11 000 (±37 000)	65 000 (±54 000)	0.76 (±0.18)	879 (±480)	55,28 (±5,63)
5	17	Große Netz-FG	627 000 (±230 000)	740 000 (±368 000)	0.31 (±0.22)	2 256 (±1 129)	70,38 (±7,12)
6	3	Hochfrequenz-FG	352 000 (±214 000)	<b>1 942 000</b> (±242 000)	0.17 (±0.11)	1 704 (±574)	75,10 (±2,12)
7	3	Hybrid-Fracht-FG	<b>2 023 000</b> (±386 000)	609 000 (±69 000)	0.18 (±0.14)	3 697 (±976)	<b>77,62</b> (±6,89)

**Tabelle 4-8: Weitere Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) von Merkmalen pro Fluggesellschaftsklasse, zur Beschreibung der Cluster, gerundet, 2010.**

FGK	Passagiere [PAX/Jahr]	Ø transport. Passagiere [PAX]	# LFZ	Anz. an Märkten	Erlös [US\$]	Erlös/ Passagier [US\$]
1	7 388 000 (±10 431 000)	104 (±42)	40 (±38)	382 (±348)	987 516 000 (±1 387 937 000)	149 (±93)
2	2 693 000 (±1 809 000)	164 (±49)	32 (±16)	182 (±144)	742 403 000 (±539 386 000)	308 (±135)
3	9 861 000 (±7 886 000)	98 (±40)	73 (±60)	750 (±577)	1 581 017 000 (±1 163 701 000)	175 (±60)
4	2 356 000 (±2 660 000)	58 (±29)	26 (±20)	157 (±124)	327 918 000 (±394 380 000)	141 (±52)
5	31 249 000 (±18 849 000)	129 (±48)	183 (±95)	2 008 (±1 821)	8 318 053 000 (±3 674 433 000)	299 (±86)
6	<b>102 514 000</b> (±15 102 000)	120 (±16)	<b>601 (±50)</b>	<b>7 575</b> (±4134)	<b>16 864 965 000</b> (±6 197 210 000)	165 (±55)
7	23 948 000 (±6 610 000)	<b>197 (±63)</b>	143 (±27)	1 711 (±1416)	9 499 871 000 (±2 378 097 000)	<b>401 (±64)</b>

### Regional-Fluggesellschaft (Small Regional Carrier), FGK 4

39 Fluggesellschaften sind dieser Klasse zugeordnet, die nur eine geringe Anzahl an Flugzeugen (durchschnittlich 26) betreiben. Im Durchschnitt befördern *Regional-Fluggesellschaften* 58 Passagiere pro Flug auf Strecken von knapp 900 km (vgl. Tabelle 4-7, Zeile 4<sup>130</sup>). Nur 2,4 Mio. Passagiere pro Jahr und wenig Fracht werden transportiert. Einzig *Shenzhen Airlines* ist als Ausreißer bei Betrachtung der Boxplot-Verteilungen zu erkennen (Passagiere: 14,7 Mio., Fracht: 229 000 t). Der Sitzladefaktor der *Regional-Fluggesellschaften* ist mit 55,3 % ebenfalls niedrig. Der Erlös pro Passagier liegt durchschnittlich bei nur 141 US\$ (vgl. Tabelle 4-8, Zeile 4). Zusammenfassend betrachtet, haben die Fluggesellschaften dieser Klasse die niedrigsten Werte im Vergleich zu allen anderen Klassen. Typische *Regional-Fluggesellschaften* sind unter anderem *CityJet*, *Olympic Air* oder *Wideroe's Flyveselskap AS*.

### Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaft (Short-haul Direct Carrier), FGK 1

Dieser Klasse sind einerseits europäische Fluggesellschaften wie *Ryanair*, *easyJet* oder *Wizz Air* (ugs. auch Billigflieger genannt<sup>131</sup>) und nordamerikanische Fluggesellschaften wie *Westjet*, *Allegiant Air* oder *Spirit Airlines* zugeordnet, andererseits auch (ehemals) staatliche Fluggesellschaften aus Ländern mit geringen Luftverkehrsaktivitäten wie z. B. *Iran Air*, *Saudi Arabian Airlines* oder *Tunisair*. Die auffälligste Kennzahl ist die hohe Netzwerk-Direktheit von 0,80 (vgl. Tabelle 4-7, Zeile 1). Das heißt, *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* bieten fast ausschließlich Direktflüge an, ein Fakt, der dieses Geschäftsmodell charakterisiert. Im Grunde transportieren diese Fluggesellschaften gar keine oder wenig Fracht um eine schnelle Bodenabfertigung (*Turnaround*) der LFZ und somit eine hohe Auslastung (*Utilization*) zu erzielen. Das 75 % Quantil liegt bei 38 000 t. Es gibt aber auch Ausreißer hiervon, wie *Germanwings* (jetzt *Eurowings Group*) oder *Garuda Indonesia*, die bis zu 375 000 t respektive 206 000 t Fracht pro Jahr transportieren. Nichtsdestotrotz ist die Zuordnung zu den *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* logisch aufgrund der hohen Überdeckung der Kennzahlen Netzwerk-Direktheit und durchschnittliche Flugdistanz.

*Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* bedienen nur eine geringe Anzahl an nahegelegenen Märkten (382) mit durchschnittlich 40 LFZ<sup>132</sup>. Im Mittel beträgt die Flugdistanz 1 237 km. Der SLF bemisst sich auf 75,33 %, bei durchschnittlich 104 Passagieren pro Flug. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird ein Gesamterlös von knapp 1 Mrd. US\$ erzielt, was heruntergebrochen einen Erlös von durchschnittlich 149 US\$ pro Passagier (vgl. Tabelle 4-8, Zeile 1) ergibt. Insgesamt werden dieser Klasse 67 Fluggesellschaften zugeordnet, die durchschnittlich 7,4 Mio. Passagiere im Jahr<sup>133</sup> befördern.

<sup>130</sup> Bei den Zeilenangaben für Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8 wird die Kopfzeile der Tabelle nicht mit einbezogen.

<sup>131</sup> Der Begriff des Billigfliegers ist weit verbreitet, jedoch unpräzise in der Beschreibung des Geschäftsmodells dieser Fluggesellschaften, welche sich neben einem dezentralen Punkt-zu-Punkt Verkehr auf eine Produktdifferenzierung spezialisiert haben. Der Kern ist das reine Flugangebot von A nach B. Zusatzleistungen können aber hinzugebucht werden (siehe auch [160]).

<sup>132</sup> Nur *Ryanair* (239) und *EasyJet* (174) operieren mit einer deutlich größeren Anzahl an LFZ.

<sup>133</sup> Kapitel 4.3.5 geht näher auf Ausreißer hierzu ein.

### Langstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaft (Long-haul Direct Carrier), FGK 2

*Langstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* sind den *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* in Bezug auf fast alle Kennzahlen ähnlich. Jedoch, wie der Name bereits impliziert, werden hauptsächlich Langstreckendestinationen bedient, so dass die durchschnittliche Flugdistanz mit 3 802 km (Tabelle 4-7, Zeile 2) deutlich größer ausfällt. Des Weiteren werden mehr Passagiere pro Flug befördert (164 Passagiere im Vergleich zu 104 Passagieren) und der SLF ist mit 77,46 % ebenfalls geringfügig besser. Insgesamt beträgt das durchschnittliche Passagieraufkommen 2,7 Mio. Passagiere pro Jahr. Der Erlös pro Passagier beziffert sich bei *Langstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* auf 308 US\$, der zweitbeste Wert über alle Klassen gesehen. Auch in Sachen Netzwerk-Direktheit fliegen die Fluggesellschaften dieser Klasse mit einem Wert von 0,82 am direktesten. Dieser Klasse sind nur acht Fluggesellschaften, unter anderem *Condor* und *Air Tahiti Nui*, zugeordnet.

### Kleine Netz-Fluggesellschaft (Small National Carrier), FGK 3

Diese Klasse umfasst *Kleine Netz-Fluggesellschaften*, die in der Regel die Hauptfluggesellschaft kleinerer Länder darstellen und ihr Land im Ausland „repräsentativ vertreten“. Nichtsdestotrotz sind sie deutlich kleiner als *Große Netz-Fluggesellschaften* und stehen oft in Konkurrenz zu diesen. Typische Vertreter sind *Swiss International Airlines*, *Alitalia*, *Oman Air* oder *Air New Zealand*. Eine Netzwerk-Direktheit von 0,33 zeigt den deutlichen Trend zu einer *Hub & Spoke* Netzwerkstruktur. Im Vergleich zu den *Kleinen Punkt-zu-Punkt Fluggesellschaften* ist der durchschnittliche SLF mit 67,6 % (vgl. Tabelle 4-7, Zeile 3) deutlich schlechter. Die Flotte umfasst durchschnittlich 73 LFZ und pro Flug werden im Durchschnitt nur 98 Passagiere transportiert. Das Transportvolumen steigt auf knapp 10 Mio. Passagiere und 90 000 t Fracht pro Jahr. Die betriebswirtschaftlichen Zahlen belaufen sich auf 175 US\$ pro Passagier und insgesamt ca. 1,6 Mrd. US\$ Gesamterlös pro Jahr.

### Große Netz-Fluggesellschaft (Major National Carrier), FGK 5

Ehemalige Staatsfluggesellschaften, heutzutage auch FSNC genannt, formen diese Klasse (17 Einzelfluggesellschaften), namentlich u. a. *Lufthansa*, *British Airways* oder *All Nippon Airways*. Im Vergleich zu den *Kleinen Netz-Fluggesellschaften* haben sie deutlich größere Marktanteile. Im Durchschnitt transportieren *Große Netz-Fluggesellschaften* jährlich 627 000 t Fracht und 31,2 Mio. Passagiere (vgl. Tabelle 4-8, Zeile 5). Die Netzwerkstruktur ist im Vergleich dazu nur unwesentlich direkter (Netzwerk-Direktheit: 0,31), jedoch bedienen Fluggesellschaften dieser Klasse knapp dreimal so viele Märkte (2008). Der SLF beträgt 70 %. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird ein Gesamterlös von durchschnittlich 8,3 Mrd. US\$ erzielt, was heruntergebrochen einen Erlös von 299 US\$ pro Passagier ergibt.

### Hochfrequenz-Fluggesellschaft (High Frequency Carrier), FGK 6

*Hochfrequenz-Fluggesellschaften* betreiben mit Abstand die größte Anzahl an LFZ, nämlich im Durchschnitt 601, so dass sich fast 2 Mrd. LFZ-Flugstunden (vgl. Tabelle 4-7, Zeile 6) pro Jahr aufsummieren. Hinzu kommen ca. 7 600 bediente Märkte. Der Betrieb dieser Fluggesellschaften basiert auf einem komplexen *Hub & Spoke* Netzwerk. Dies manifestiert sich in einer Netzwerk-Direktheit von nur 0,17, dem indirektesten Netzwerk aller Klassen. Weiterhin werden durchschnittlich über 102 Mio. Passagiere und 352 000 t Fracht pro Jahr transportiert. Diese Klasse wird durch nur drei Fluggesellschaften repräsentiert, beheimatet in Nordamerika: *Delta Air Lines*, *American Airlines* und *Southwest Airlines*. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten ist *Southwest Airlines* eher als LCC allseits bekannt. Dennoch spricht für eine Zuordnung zu dieser

Klasse, dass *Southwest Airlines* Umsteigeverbindungen anbietet, was die Direktheit des Netzwerkes reduziert. Weiterhin transportiert *Southwest Airlines* auch Fracht und betreibt ca. 550 LFZ, was eine Zuordnung zu dieser und nicht zur Klasse der *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* bekräftigt. *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* generieren durchschnittlich einen Gesamterlös von knapp 16,9 Mrd. US\$, doppelt so viel im Vergleich zu *Großen Netz-Fluggesellschaften*. Aufgrund des hohen Passagieraufkommens ergibt sich aber nur ein Erlös pro Passagier von 165 US\$.

#### Hybrid-Fracht-Fluggesellschaft (Freight Hub Carrier), FGK 7

Diese Klasse besteht ebenfalls aus nur drei Fluggesellschaften: *Emirates*, *Cathay Pacific* und *Korean Air*. *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften* sind in diesem Zusammenhang keine Fluggesellschaften, die ausschließlich Fracht transportieren (wie z. B. *Lufthansa Cargo* oder *Aerologic*), sondern Passagier-Fluggesellschaften, die gleichzeitig ein überdurchschnittlich hohes Frachtvolumen aufweisen. Dieses beziffert sich auf durchschnittlich 2 Mio. Tonnen pro Jahr (Tabelle 4-7, Zeile 7). Das Netzwerk der *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften* ist indirekt und dediziert auf die Langstrecke ausgelegt. Die durchschnittliche Flugdistanz beträgt knapp 3 700 km und die Netzwerk-Direktheit ist mit 0,18 auf dem Niveau der *Hochfrequenz-Fluggesellschaften*. Die Flotte dieser Fluggesellschaften besteht ausschließlich aus Langstreckenflugzeugen<sup>134</sup> (unter anderem *Airbus A380*, *Boeing 777*, etc.). Hieraus resultiert ebenfalls die hohe Passagieranzahl pro Flug von 197 Passagieren. Weiterhin charakteristisch ist ein SLF von fast 78 %, der höchste Wert über alle Klassen gesehen. Schließlich generieren *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften* einen durchschnittlichen Gesamterlös von 9,5 Mrd. US\$ pro Jahr, was heruntergebrochen ein Erlös pro Passagier von 401 US\$ ergibt.

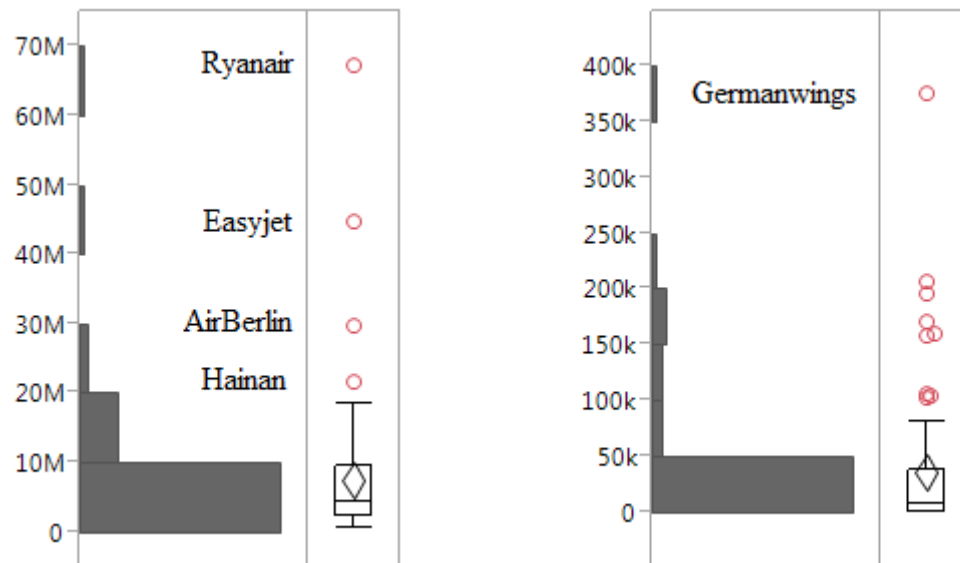
### 4.3.5 Diskussion und Zusammenfassung

Generell zeigt sich, wie bereits bei den Flughäfen, auch bei den Fluggesellschaften die Schwierigkeit, eine übergreifende homogene Struktur über alle Klassen hinweg zu erzeugen. Der Fluggesellschaftsmarkt ist, ebenso wie das gesamte LTS, kein in sich abgeschlossenes System und wird durch umwelttechnische, politische und regulatorische Zwänge beeinflusst. Jede Fluggesellschaft ist einzigartig und versucht in diesem hart umkämpften und gleichzeitig volatilen Markt ihre Nische zu finden. Nichtsdestotrotz resultiert die Clusteranalyse mit den gewählten Merkmalen in einer sinnvollen Klasseneinteilung, die zugleich neuartige Klassen im Vergleich zur bisherigen Literatur aufzeigt.

Cluster 1, 2, 6 und 7 repräsentieren überwiegend eine 2 x 2 Matrix von extremen Werten der Merkmale durchschnittliche Flugdistanz und Netzwerk-Direktheit. Es ist offensichtlich, dass diese Kennzahlen die Klassenbildung maßgeblich beeinflussen. *Regional-Fluggesellschaften*, sind ähnlich zu *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften*, in Bezug auf die beiden genannten Merkmale. Erstgenannte separieren sich aber aufgrund des niedrigen SLF. Weiterhin ist es entscheidend, die durchschnittliche Flugdistanz einzubinden. Hierbei trennen sich typische LCC, die vorzugsweise regional fliegen, von „Langstrecken-LCC“, auch Charterfluggesellschaften genannt. Im Gegensatz dazu rangieren *Kleine* und *Große Netz-Fluggesellschaften* im Mittelfeld bezogen auf durchschnittliche Flugdistanz und Netzwerk-Direktheit. Beide haben zudem ähnliche Werte bzgl. des SLF. Jedoch transportieren *Große Netz-Fluggesellschaften*

<sup>134</sup> [http://www.emirates.com/de/german/flying/our\\_fleet/our\\_fleet.aspx](http://www.emirates.com/de/german/flying/our_fleet/our_fleet.aspx);  
[http://www.cathaypacific.com/cx/de\\_DE/travel-information/flight/aircraft-fleet.html](http://www.cathaypacific.com/cx/de_DE/travel-information/flight/aircraft-fleet.html);  
<http://www.koreanair.com/global/de/traveling/fleet-info.html>, zuletzt geprüft am 23. November 2017.





**Abbildung 4-24: Histogramm & Box-Plot der Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften;**  
**Links: Passagierzahl [PAX], Rechts: Fracht [Tonnen/Jahr].**

zehnmal so viel Fracht und haben die dreifache Anzahl an LFZ-Flugstunden im Vergleich zu *Kleinen Netz-Fluggesellschaften*. Diese beiden Kennzahlen bewirken eine Differenzierung dieser beiden Fluggesellschaftsklassen.

Wie im vorhergehenden Absatz und auch bereits bei den Flughafenklassen angesprochen, prägen bestimmte Merkmale einen Cluster, so dass größere Streuungen anderer Merkmale auftreten können. Bei genauerer Betrachtung der *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* fallen mehrere Fluggesellschaften auf, die in Bezug auf das Passagiervolumen (siehe Abbildung 4-24, links) und LFZ-Flugstunden zu Ausreißern zählen, aber gleichzeitig die „*Big Player*“ am LCC-Markt darstellen. Hierzu gehören unter anderem *Ryanair*, *easyJet*, *AirBerlin*<sup>135</sup> und *Hainan Airlines*. Genauso gibt es Ausreißer beim Transport von Fracht, wie bspw. *Germanwings* (siehe Abbildung 4-24, rechts). Infolgedessen sind die Standardabweichungen dieser Merkmale der Klasse besonders hoch, sogar über dem Mittelwert.

Die Werte der einzelnen Fluggesellschaftsklassen bezüglich der weiteren, beschreibenden Merkmale (vgl. Tabelle 4-8) grenzen sich ebenfalls untereinander ab. Bei den beförderten Passagieren pro Jahr ergibt sich eine Spanne von rund 2,5 Millionen Passagieren (FGK 4) bis hin zu 102 Millionen Passagieren (FGK 6). Weiterhin kann der Markt einer Fluggesellschaftsklasse von 157 Märkten (FGK 4), über ca. 2 000 Märkte (FGK 5) bis hin zu 7 500 Märkten (FGK 6) umfassen. Auch bezüglich der ökonomischen Merkmale zeigen sich Unterschiede. Angefangen von rund 150 US\$ - 175 US\$ pro Passagier (FGK 1, 3, 4, 6) bis hin zu 400 US\$ pro Passagier (FGK 7). Es kommt die Frage auf, ob die modellierten Fluggesellschaftsklassen auch als Indikator für die Ertragskraft eines Geschäftsmodells herangezogen werden können. Hierfür müssten zusätzlich die Aufwände einer Fluggesellschaft modelliert werden, welche unter anderem die direkten und indirekten Betriebskosten (*Direct/Indirect Operating Costs*) umfassen. Diese werden zwar in der Regel von den Fluggesellschaften in ihren Geschäftsberichten veröffentlicht, jedoch meist auf einem aggregierten Level (vgl. [143]). Ein direkter Vergleich mit den Erlösen ist mitunter nicht immer möglich und bedarf einer sorgfältigen Analyse.

<sup>135</sup> *AirBerlin* hat den Flugbetrieb zum 28. Oktober 2017 eingestellt [161].

Zur Verifizierung der Lösung mit sieben Clustern werden wiederum weitere Lösungen betrachtet. Bei einer Erhöhung der Clusteranzahl auf acht würde sich ein Cluster mit fünf Elementen vom Cluster der *Großen Netz-Fluggesellschaften* abspalten, welcher die Fluggesellschaften *Singapur Airlines*, *Etihad Airways*, *EVA Airways*, *Qatar Airways* und *Thai Airways* umfassen würde. Diese Fluggesellschaften haben höhere Flugdistanzen (durchschnittlich 3 000 km) im Vergleich zu den restlichen Fluggesellschaften der *Großen Netz-Fluggesellschaften*. Bei einer Lösung mit sechs Clustern würden die *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* mit den *Großen Netz-Fluggesellschaften* fusionieren. Bezüglich der Ausprägung der Merkmale LFZ-Flugstunden pro Jahr (resultierend aus einer größeren Flotte) und Netzwerk-Direktheit wäre diese Fusionierung aber kritisch zu betrachten, da sich die *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* über diese beiden Merkmale deutlich abgrenzen. Beide Varianten sind somit nach Meinung des Autors schlechter als die Lösung mit sieben Clustern.

Zusammenfassend zeigt das Ergebnis dieser Clusteranalyse die Plausibilität der Merkmalsauswahl und resultiert in geläufigen Geschäftsmodellen von Fluggesellschaften. Jedoch erweitern spezifische Differenzierungen von Geschäftsmodellen wie *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* und *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften* die Landschaft an Fluggesellschaften gewinnbringend. Weiterhin stellen die Ergebnisse Parallelen zu anderen Studien dar, die sich mit der Klassifizierung von Fluggesellschaften beschäftigen. *Dewulf* analysierte, ebenfalls mittels einer Clusteranalyse, die Strategien von Frachtfluggesellschaften (vgl. Kapitel 3.2.6). Obgleich die Zielrichtung eine andere war, mündete *Dewulfs* Analyse ebenfalls in sieben, teilweise vergleichbaren Klassen (siehe Tabelle 4-9). Cluster 7 (*The Hugh Americans*) enthält wie die Klasse der *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* nur die US-Marktführer. Des Weiteren ist die Klasse der *Kleinen Netz-Fluggesellschaften* dem Cluster 5 (*Strong Regionals*) ähnlich. Die fett markierten Fluggesellschaften in Tabelle 4-9 (*Jet Airways* (9W), *Gol Linhas Aéreas* (G3), *LAN Airlines* (LA), *Swiss International Airlines* (LX), *Malaysia Airlines* (MH), *South African Airways* (SA), *SAS Scandinavian Airlines* (SK), *Saudi Arabian Airlines* (SV)) gruppieren sich auch in der oben aufgezeigten Clusteranalyse in einer Klasse (FGK 3). Cluster 1 (Cargo Stars) und Cluster 2 (Large Passenger Wide-Body Operators) sind vergleichbar mit den Großen Netz-Fluggesellschaften (FGK 5)<sup>136</sup>.

**Tabelle 4-9: Clusterergebnis von Dewulf [124] S. 118, angegeben ist der IATA-Code<sup>137</sup>, nur Fluggesellschaften mit kombiniertem Passagier-/Frachtverkehr.**

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7
AF	BA	AV	AC	<b>9W</b>	IB	AA
EK	CO	BD	CX	CI	KE	<b>DL</b>
<b>LH</b>	<b>CZ</b>	ET	KL	<b>G3</b>	QR	
	<b>QF</b>	EY	SQ	BR	TG	
		GF	CA	<b>LA</b>	TK	
		LY	JC	<b>LX</b>	NH	
		PR	MU	<b>MH</b>		
		SN		<b>SA</b>		
		[...]		<b>SK</b>		
				<b>SV</b>		
				[...]		

<sup>136</sup> Cluster 1 und Cluster 2 von *Dewulf* bildeten bei einer der beschriebenen, vorhergehenden Iteration sogar einen gemeinsamen Cluster (siehe [124] S. 115).

<sup>137</sup> Eine Suchfunktion ist unter <http://www.iata.org/publications/Pages/code-search.aspx> zu finden.

#### 4.3.6 Einbindung der Fluggesellschaftsklassen

Die modellierten Fluggesellschaftsklassen bilden nun die Grundlage, den Anteil der Flugbewegungen von Fluggesellschaften an den betrachteten Flughäfen zu beschreiben und auf dessen Basis zu ermitteln, inwieweit die Flughafenklassen durch die jeweiligen Fluggesellschaftsklassen typischerweise genutzt werden. Dies wird in Tabelle 4-10 dargestellt.

Die Spalte Flugbewegungsanteil der FGK 0 stellt hierbei den Anteil der Flugbewegungen von Fluggesellschaften dar, die in den genutzten Daten nicht benannt sind, so dass keine Zuweisung der Flüge zu den eigentlichen Fluggesellschaftsklassen erfolgen kann. Die verbliebenen sieben Spalten entsprechen den im Vorhinein eingeführten Fluggesellschaftsklassen.

*Kleine Regional-Flughäfen* werden zu mehr als einem Drittel (36 %) von *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* angefliegen, was deren Geschäftsmodell, größere Flughäfen aufgrund höherer Landegebühren zu meiden, widerspiegelt. Auffällig ist, dass der Anteil der *Regional-Fluggesellschaften* (FGK 4) bei *Kleinen Regional-Flughäfen* mit 7 % gering ausfällt (vgl. Tabelle 4-10, Zeile 3). Im Vergleich zu den anderen Klassen ist dieser Wert aber der größte. Ein Grund hierfür ist die begrenzte Anzahl an Regionalflughäfen, die in die Analyse einfließen. Ein großer Teil von *Regional-Fluggesellschaften* (FGK 4) fliegen in der Regel noch kleinere Flughäfen an, die in dieser Arbeit nicht betrachtet werden<sup>138</sup>. Der größte Anteil (21 %) bei den *Großen Regional-Flughäfen* entfällt gleichermaßen auf *Kleine Netz-Fluggesellschaften* (FGK 3) und ebenso auf *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* (FGK 6, vgl. Tabelle 4-10, Zeile 2). Diese beiden Anteile spiegeln auch die geografische Verteilung der Flughäfen dieser Klasse wider. Die *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* bedienen hauptsächlich die 28 US-amerikanischen Flughäfen dieser Klasse. Hier liegt der Flugbewegungsanteil der FGK 6 im Mittel sogar bei 58 %<sup>139</sup>.

**Tabelle 4-10: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Flugbewegungsanteile der Fluggesellschaftsklassen (FBA d. FGK) pro Flughafenklasse, Datenbasis: [7].**

Name der FH-Klasse	FBA d. FGK 0	FBA d. FGK 1	FBA d. FGK 2	FBA d. FGK 3	FBA d. FGK 4	FBA d. FGK 5	FBA d. FGK 6	FBA d. FGK 7
<i>Internationale FH</i>	0,19 (±0,13)	0,18 (±0,18)	0,01 (±0,04)	<b>0,30</b> (±0,25)	0,03 (±0,07)	0,15 (±0,15)	0,12 (±0,23)	0,02 (±0,03)
<i>Große Regional-FH</i>	0,20 (±0,17)	0,18 (±0,21)	0,01 (±0,04)	<b>0,21</b> (±0,20)	0,03 (±0,08)	0,12 (±0,13)	<b>0,21</b> (±0,28)	0,02 (±0,07)
<i>Kleine Regional-FH</i>	0,29 (±0,21)	<b>0,36</b> (±0,32)	0,01 (±0,02)	0,14 (±0,20)	0,07 (±0,16)	0,09 (±0,10)	0,03 (±0,11)	0,01 (±0,02)
<i>Fracht-Hub-FH</i>	0,11 (±0,04)	0,07 (±0,07)	0,00 (±0,00)	<b>0,28</b> (±0,25)	0,01 (±0,02)	0,22 (±0,26)	0,17 (±0,23)	0,14 (±0,20)
<i>Internationale Hub-FH</i>	0,14 (±0,09)	0,06 (±0,05)	0,01 (±0,02)	0,15 (±0,20)	0,02 (±0,03)	<b>0,42</b> (±0,26)	0,11 (±0,20)	0,07 (±0,15)
<i>Hochfrequenz-Hub-FH</i>	0,05 (±0,01)	0,03 (±0,04)	0,00 (±0,00)	0,28 (±0,08)	0,00 (±0,00)	0,14 (±0,15)	<b>0,50</b> (±0,26)	0,00 (±0,00)
<i>Sekundäre Hub-FH</i>	0,20 (±0,20)	0,05 (±0,08)	0,00 (±0,00)	<b>0,30</b> (±0,22)	0,01 (±0,03)	0,22 (±0,27)	0,22 (±0,24)	0,01 (±0,01)

<sup>138</sup> Z. B. ist aus dem Netzwerk von Olympic Air [162] nur der Flughafen Athen Eleftherios Venizelos im Stichprobenumfang für die Flughafenklassifizierung vertreten. Ähnlich verhält es sich bei Wideroe's Flyveselskap AS [162].

<sup>139</sup> Die dominierende Fluggesellschaft ist Southwest Airlines.

Im Gegensatz dazu dominieren *Kleine Netz-Fluggesellschaften* in den restlichen Weltregionen, dicht gefolgt von *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* mit 18 %. An den *Internationalen Flughäfen* und *Sekundären Hub-Flughäfen* dominieren mit einem Anteil von 30 % klar die *Kleinen Netz-Fluggesellschaften* (FGK 3, vgl. Tabelle 4-10, Zeile 7). Bei den *Sekundären Hub-Flughäfen* folgen mit jeweils 22 % die *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* (FGK 6) und *Große Netz-Fluggesellschaften* (FGK 5). Der Anteil der *Großen Netz-Fluggesellschaften* steigt auf 42 % bei den *Internationalen Hub-Flughäfen*. Dieser Fakt unterstreicht, dass sich die führenden Fluggesellschaften und dadurch deren Netz auf bestimmte *Hub-Flughäfen* konzentrieren. Deutlich zweigeteilt ist die Situation bei den *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen*. Es dominieren mit einem Anteil von 50 %, wie der Name bereits impliziert, die *Hochfrequenz-Fluggesellschaften*, gefolgt von den *Kleinen Netz-Fluggesellschaften* mit 28 %. Bei den *Fracht-Hub-Flughäfen* ist der Anteil der *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften* (FGK 7) mit 14 % überraschend gering. Dennoch ist dieser Anteil über alle Flughafenklassen gesehen mit Abstand der größte. Der Grund hierfür kann darin liegen, dass reine Frachtfluggesellschaften (z. B. *Lufthansa Cargo*) respektive *Integrator*, wie *United Parcel Service* (UPS) und *Federal Express Corporation* (FedEx) nicht Teil der Datengrundlage sind. Den größten Anteil bei den *Fracht-Hub-Flughäfen* nehmen die *Kleinen Netz-Fluggesellschaften* ein.

## 4.4 Erlöse und Kosten der Flughafenklassen

In Bezug auf die betriebswirtschaftlichen Aspekte eines Flughafens, nehmen die Erlöse und Kosten eine zentrale Rolle ein. Flughäfen generieren Erlöse aus einer Kombination von Flugverkehr und nicht-flugbezogenen, kommerziellen Aktivitäten (vgl. Kapitel 2.3.2). In diesem Kapitel wird zunächst auf die Verkehrsentgelte (Kapitel 4.4.1) und nicht-flugbezogene, kommerzielle Erlöse (Kapitel 4.4.2) eingegangen, die die modellierten Flughafenklassen im Durchschnitt generieren können. Im Anschluss daran wird die Kostenseite näher betrachtet (Kapitel 4.4.3).

### 4.4.1 Verkehrsentgelte

Ein Vergleich zwischen Verkehrsentgelten ist, ähnlich wie bei den nicht-flugbezogenen Entgelten, nicht trivial. US-amerikanische Flughäfen berechnen das Landeentgelt in Abhängigkeit des maximalen Landegewichts (*Maximum Landing Mass*, MLM), während europäische und asiatische Flughäfen auf das MTOM als Basis zurückgreifen. Auch Passagier-abhängige Landegebühren sind bei asiatischen Flughäfen teilweise vorhanden [146] S. 45. Ähnlich komplex verhält es sich bei LFZ-Abfertigungsgebühren, LFZ-Abstellentgelten und Emissionsentgelten. Vor allem Erstgenannte sind teilweise vertraulich, da sie zwischen den Beteiligten verhandelt werden. Somit werden diese Anteile der Verkehrsentgelte im Folgenden nicht betrachtet, ebenso nicht die (Luft-) Sicherheitsentgelte.

Tabelle 4-11 zeigt die durchschnittlichen *Terminal-Passagierentgelte* und *Landeentgelte* verschiedener LFZ-Typen für die modellierten Flughafenklassen. Dabei wird bei allen LFZ-Typen eine Zwei-Klassen-Bestuhlung (außer beim *Bombardier CRJ200*) und ein SLF von 75 % angenommen. Beim Terminal-Passagierentgelt fällt der niedrige Wert der *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* ins Auge. Im Durchschnitt werden nur 1,8 US\$ pro Passagier erhoben. Dies ist weniger als ein Sechstel im Vergleich zu den *Internationalen Hub-Flughäfen*.

**Tabelle 4-11: Klassen-spezifische MW und STABW der Terminal-Passagierentgelte pro PAX und Landeentgelte versch. LFZ-Typen<sup>140</sup> pro Flughafenklasse, Datenquelle: [72], 2013.**

Name	Terminal-Passagier-entgelt/PAX [US\$]	Lande-entgelt 747 [US\$]	Lande-entgelt 767 [US\$]	Lande-entgelt 737 [US\$]	Lande-entgelt A320 [US\$]	Lande-entgelt CRJ200 <sup>141</sup> [US\$]
<i>Internationale FH</i>	6,8 (±4,7)	3 078 (±1 622)	1 695 (±1 062)	721 (±492)	687 (±479)	292 (±405)
<i>Große Regional-FH</i>	5,5 (±3,8)	3 184 (±1 876)	1 718 (±1 051)	663 (±381)	639 (±349)	201 (±132)
<i>Kleine Regional-FH</i>	8,0 (±3,6)	3 397 (±1 905)	1 783 (±1 015)	692 (±414)	667 (±385)	228 (±136)
<i>Fracht-Hub-FH</i>	4,0 (±2,8)	2 316 (±1 089)	1 211 (±556)	509 (±257)	483 (±239)	224 (±153)
<i>Internationale Hub-FH</i>	11,2 (±6,3)	4 461 (±3 203)	2 383 (±1 646)	1 107 (±1 016)	1 054 (±1 001)	568 (±980)
<i>Hochfrequenz-Hub-FH</i>	1,8 (±1,4)	2 536 (±1 136)	1 441 (±526)	650 (±165)	648 (±164)	270 (±54)
<i>Sekundäre Hub-FH</i>	4,2 (±4,1)	2 279 (±1 615)	1 267 (±862)	562 (±365)	550 (±344)	202 (±144)

Über alle betrachteten LFZ gesehen, erheben die *Internationalen Hub-Flughäfen* durchschnittlich die höchsten Landeentgelte. Vor allem bei den Großraum-LFZ (*Wide-body Aircraft*) ist der Unterschied zum zweithöchsten Entgelt enorm, z. B. rund 1 000 US\$ bei der *Boeing 747* respektive, 600 US\$ bei der *Boeing 767*. Erstaunlich ist, dass *Kleine Regional-flughäfen* oft den zweiten Rang in Bezug auf das Entgelt hinter den *Internationalen Hub-Flughäfen* einnehmen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass Regionalflughäfen mit wenigen Flugbewegungen ihre fixen Kosten decken müssen, im Gegensatz zu *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen*, die niedrige Entgelte durch die hohe Anzahl an Flugbewegungen ausgleichen.

Bei näherer Betrachtung einzelner Flughäfen ist die Erhebung von überdurchschnittlichen Entgelten erkennbar. Das Terminal-Passagierentgelt am Flughafen *London Heathrow* (LHR) beträgt z. B. 30,7 US\$, fast 20 US\$ über dem Durchschnitt der *Internationalen Hub-Flughäfen*. Des Weiteren fällt auf, dass Mittel- und Kurzstrecken-LFZ im Vergleich zu Langstrecken-LFZ mit hohen Landeentgelten am Flughafen *London Heathrow* (LHR) belegt werden. Absolut beläuft sich das Entgelt auf ca. 4 000 US\$ pro *Boeing 737/Airbus A320*, 3 000 US\$ über dem Durchschnitt der *Internationalen Hub-Flughäfen*. Dadurch ergibt sich, dass das Verhältnis der Entgelte pro Tonne MTOM zwischen Kleinraum- und Großraum-LFZ (*Airbus A320* vs. *Boeing 747*) doppelt so hoch ausfällt. Die Flughäfen *London Gatwick* (LGW, 2,5-fach höher) und *Atlanta Hartsfield-Jackson* (ATL, 2,1-fach höher)<sup>142</sup> fahren eine ähnliche Strategie (vgl. Anhang E). Durchschnittlich liegt dieses Verhältnis bei knapp 1,4<sup>143</sup>. Die genannten Flughäfen haben gemeinsam, dass sie unter Kapazitätsengpässen leiden und nur wenige freie Slots zur Verfügung stehen. Dadurch verteuern sie die Landung für Kleinraum-LFZ, um Fluggesell-

<sup>140</sup> Weitere Annahmen: *Boeing 747-400*: 524 Sitze; *Boeing 767-400*: 304 Sitze; *Boeing 737-800*: 162 Sitze; *Airbus A320*: 150 Sitze; *Bombardier CRJ200*: 50 Sitze.

<sup>141</sup> *Bombardier Canadair Regional Jet*.

<sup>142</sup> Die absoluten Werte sind im Vergleich aber niedrig.

<sup>143</sup> Die Daten liegen nicht für alle Flughäfen vor, so dass nur 196 Flughäfen die Grundgesamtheit bilden. Eine zweite Studie (siehe Anhang , Kapitel 8.5.2) bestätigt diese Ergebnisse.

schaften dazu zu bewegen, einen möglichen freien Slot mit einem Großraum-LFZ zu belegen. In der Folge erhöhen sich die Erlöse für den Flughafen durch höhere Terminal-Passagierentgelte und mögliche kommerzielle Erlöse. Bei den *Sekundären Hub-Flughäfen* sticht der Flughafen *Madrid Barajas* (MAD) mit überdurchschnittlichen Terminal-Passagierentgelten (15 US\$) und der Flughafen *Toronto Lester B. Pearson* (YYZ) mit überdurchschnittlichen Landeentgelten (*Boeing 747*: 6 700 US\$) hervor [163].

#### 4.4.2 Nicht-flugbezogene, kommerzielle Erlöse

Wie in Kapitel 2.3.2 bereits angedeutet, ist die Bestimmung von nicht-flugbezogenen Erlösen von Flughäfen komplex. Einerseits fehlt es an einer einheitlichen Definition und andererseits an der entsprechenden Datengrundlage. Daher wird hier nur eine Bestimmung in Abhängigkeit von den Verkehrsentgelten durchgeführt.

Tabelle 4-12 gibt den Anteil der nicht-flugbezogenen Erlöse für jede Flughafenklasse an. Bei gegebenen Verkehrsentgelten kann somit der nicht-flugbezogene, kommerzielle Erlös sowie der Gesamterlös eines Flughafens abgeschätzt werden. Die Klasse der *Großen Regional-Flughäfen* erzielen mit durchschnittlich 53,7 % knapp über die Hälfte ihrer Erlöse aus nicht-flugbezogenen Tätigkeiten, gefolgt von den *Internationalen Hub-Flughäfen* mit 51,4 %. Die verbliebenen Klassen erzielen weniger als die Hälfte der Erlöse mit nicht-flugbezogenen Aktivitäten. Mit 44,3 % ist der Anteil bei den *Sekundären Hub-Flughäfen* am geringsten.

**Tabelle 4-12: Klassen-spezifische MW und STABW der Anteile der nicht-flugbezogenen Erlöse pro Flughafenklasse, Datenquelle [72].**

Name	Nicht-Flugbezogener Erlös [%]
<i>Internationale FH</i>	46,2 (±13,2)
<i>Große Regional-FH</i>	53,7 (±13,3)
<i>Kleine Regional-FH</i>	47,4 (±10,9)
<i>Fracht-Hub-FH</i>	45,8 (±21,0)
<i>Internationale Hub-FH</i>	51,4 (±13,7)
<i>Hochfrequenz-Hub-FH</i>	49,5 (±14,4)
<i>Sekundäre Hub-FH</i>	44,3 (±12,8)

#### 4.4.3 Kosten von Flughäfen

Den Erlösen eines Flughafens stehen Kosten gegenüber. Tabelle 4-13 zeigt *Personalkosten* und *variable Kosten* in Abhängigkeit von der Anzahl an Passagieren respektive von den WLU. Bei den Personalkosten können die *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* aufgrund ihrer hohen Passagieranzahl geringe Werte erzielen. Sie liegen bei nur 2,11 US\$ pro Passagier. Im Vergleich dazu sind die Personalkosten pro Passagier der *Internationalen Hub-Flughäfen* 2,5-mal höher. Ähnlich ist die Verteilung bei den variablen Kosten pro Passagier. Mit 6,05 US\$ haben wiederum die *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* die geringsten und die *Internationalen Hub-Flughäfen* die höchsten Kosten pro Passagier (15,42 US\$). Werden die WLU (vgl. S. 22) als Bezugsgröße betrachtet, erzielen die *Fracht-Hub-Flughäfen* durch hohe Frachturnschläge mit 1,11 US\$ die geringsten Personalkosten und ebenso die geringsten variablen Kosten (3,48 US\$).

Jedoch sind die Ergebnisse aus Tabelle 4-13 kritisch zu bewerten. Im Gegensatz zu allen anderen Analysen dieser Arbeit, ist eine regionsübergreifende Betrachtung von Kosten nicht zu empfehlen. Kosten sind regionsspezifisch und vor allem Personalkosten sind von Land zu Land unterschiedlich. Tabelle 4-14 zeigt die Kosten der *Internationalen Hub-Flughäfen* aufgeschlüsselt nach Kontinenten. Die Personalkosten pro Passagier im asiatisch-pazifischen Raum liegen bei weniger als einem Drittel der Personalkosten in Europa. Nordamerika liegt mit durchschnittlich 4,17 US\$ genau dazwischen. Tabelle 4-13 zeigt ebenso bei anderen Klassen im Durchschnitt ähnliche Personalkosten pro Passagier: *Internationale Flughäfen* - 4,05 US\$, *Große Regional-Flughäfen* - 4,47 US\$ und *Kleine Regional-Flughäfen* - 4,53 US\$. Auch hier zeigen sich deutliche Unterschiede, wenn die regionale Lage der Flughäfen mit in die Betrachtung einbezogen wird. Bei den variablen Kosten pro Passagier ist ein ähnlicher Trend zu erkennen. Mit 21,03 US\$ pro Passagier sind die Kosten in Europa annähernd doppelt so hoch im Vergleich zum asiatisch-pazifischen Raum.

**Tabelle 4-13: Klassen-spezifische MW und STABW verschiedener Kostenverhältnisse pro Flughafenklasse, Datenquelle [72].**

Name	Personal-kosten/ PAX [US\$]	Personal-kosten/ WLU [US\$]	Variable Kosten/ PAX [US\$]	Variable Kosten/ WLU [US\$]
<i>Internationale FH</i>	4,05 (3,35)	3,66 (3,02)	10,60 (6,06)	9,64 (5,67)
<i>Große Regional-FH</i>	4,47 (3,39)	3,95 (2,86)	11,18 (6,77)	9,90 (5,56)
<i>Kleine Regional-FH</i>	4,53 (3,49)	<b>4,18 (3,28)</b>	11,35 (7,10)	10,70 (6,52)
<i>Fracht-Hub-FH</i>	3,56 (1,86)	1,11 (0,73)	9,23 (1,73)	3,48 (2,32)
<i>Internationale Hub-FH</i>	<b>5,27 (5,34)</b>	3,94 (3,85)	<b>15,42 (8,97)</b>	<b>11,48 (6,29)</b>
<i>Hochfrequenz-Hub-FH</i>	2,11 (0,95)	1,90 (0,88)	6,05 (2,43)	5,42 (2,17)
<i>Sekundäre Hub-FH</i>	2,75 (1,35)	2,53 (1,21)	6,86 (3,24)	6,29 (2,89)

**Tabelle 4-14: Regional-spezifische MW und STABW verschiedener Kostenverhältnisse der Internationalen Hub-Flughäfen, Datenquelle [72].**

Kontinent	Personal-kosten/ PAX [US\$]	Personal-kosten/ WLU [US\$]	Variable Kosten/ PAX [US\$]	Variable Kosten/ WLU [US\$]
Asien/Pazifik	2,60 (1,50)	1,91 (1,08)	12,27 (9,69)	8,68 (2,66)
Europa	8,60 (7,68)	6,42 (5,44)	21,03 (8,89)	16,03 (6,50)
Nordamerika	4,17 (1,12)	3,16 (1,01)	11,31 (2,75)	8,56 (2,66)

In Kapitel 2.3.2 wird eine Studie erwähnt, die die Kosten für eine WLU bzw. die Stückkosten im Jahr 1999 bei Flughäfen mit unter 300 000 WLU pro Jahr mit 15 US\$ beziffert. Bei Flughäfen zwischen 300 000 und 2,5 Mio. WLU betrugen die Stückkosten nur noch 9,4 US\$ und zwischen 2,5 Mio. und 25 Mio. WLU waren es 8 US\$ [75]. Diese Kosten für Flughäfen können mit den o. g. Ergebnissen annähernd bestätigt werden. Für *Große Regional-Flughäfen*, die in die dritte Größengruppe, also Flughäfen zwischen 2,5 Mio. und 25 Mio. WLU fallen, ergeben sich Gesamtkosten von 13,85 US\$<sup>144</sup> (2012). Inflationsbereinigt<sup>145</sup> waren dies 9,56 US\$ im Jahr 1999. Ähnlich verhält es sich bei den *Kleinen Regional-Flughäfen*. Für die anderen Größengruppen können keine Vergleiche gezogen werden, da alle verbliebenen Flughafenklassen deutlich über 25 Mio. WLU pro Jahr aufweisen.

Nichtsdestotrotz sinken die Kosten nicht zwingend mit zunehmender Passagieranzahl bzw. zunehmenden Frachtumschlag. Bei *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* und *Fracht-Hub-Flughäfen* ist dies zwar der Fall, jedoch zeigen *Internationale Hub-Flughäfen* bei vergleichbaren WLU deutlich höhere Kosten. Die durchschnittlichen Gesamtkosten pro WLU der *Internationalen Hub-Flughäfen* belaufen sich auf 15,42 US\$<sup>146</sup>, der höchste Wert über alle Klassen gesehen.

## 4.5 Erstellung von generischen Flugplänen für Flughafenklassen

Kapitel 4.1 und Kapitel 4.3 beschreiben die Modellierung von Klassen von Flughäfen respektive Fluggesellschaften. Das verbindende Element dieser beiden Stakeholder ist der Flugplan. Um die operationelle und ökonomische Situation eines Flughafens bzw. hier Flughafenrepräsentanten adäquat zu modellieren (siehe Ziele Kapitel 1.2), wird ein Flugplan benötigt. Es gibt jedoch nicht den einen Flugplan eines bestimmten Flughafens, der für den Flughafenrepräsentanten einer Klasse herangezogen werden kann, da sich in einer Klasse mehrere reale Flughäfen befinden. Deshalb wird für jede Klasse ein sogenannter *generischer Flugplan* entwickelt, der auf Basis realer Flugpläne der einzelnen Klassenrepräsentanten entsteht. Dieser generische Flugplan besteht folglich nicht mehr aus spezifischen Informationen (z. B. Fluggesellschaft: *Lufthansa*), sondern nur aus der Information der Klassenzugehörigkeit,

<sup>144</sup> Ergibt sich aus der Addition von 3,95 US\$ Personalkosten/WLU und 9,90 US\$ variablen Kosten/WLU (siehe Tabelle 4-13).

<sup>145</sup> Angenommen wird eine Inflation von 2,68 % pro Jahr. Dies entspricht der durchschnittlichen, jährlichen Inflation der OECD-Mitgliedsstaaten von 1999 bis 2012 [164].

<sup>146</sup> Ergibt sich aus der Addition von 3,94 US\$ Personalkosten/WLU und 11,48 US\$ variablen Kosten/WLU (siehe Tabelle 4-13, Zeile 5).



deren Zustandekommen in den vorangegangenen Kapiteln erläutert wird (z. B. Fluggesellschaft *Lufthansa*  $\triangleq$  FGK 5 - *Große Netz-Fluggesellschaften*).

Das Kapitel beginnt mit Erläuterungen zu den Begriffen Flugplan und Slot (Kapitel 4.5.1). Danach geht Kapitel 4.5.2 auf typische SLB-Konfigurationen ein, gefolgt von der Bestimmung der theoretischen SLB-Kapazität der einzelnen Flughafenklassen (Kapitel 4.5.3). Diese wird später benötigt, um die Anzahl der Flugbewegungen pro definierte Zeiteinheit zu begrenzen. In Kapitel 4.5.4 wird anschließend schrittweise erläutert, wie bei der Modellierung von generischen Flugplänen vorgegangen wird. Kapitel 4.5.5 stellt die Ergebnisse der Analysen vor und zum Abschluss erfolgen eine Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse (Kapitel 4.5.6).

#### 4.5.1 Flugplan und Slots

Beide Stakeholder des LTS, der Flughafen und die Fluggesellschaft, stellen unterschiedliche Anforderungen an ihren Flugplan. Die Erstellung eines Flugplans einer Fluggesellschaft (*Airline Scheduling*) charakterisieren *Jacobs et al.* als integrierten, vermaschten Prozess mit starker Überlagerung zum Marketing und Vertrieb [165]. Daraus folgt, dass ein Flugplan einer Fluggesellschaft nicht nur beschreibt, wann und wohin diese fliegt, sondern sich vielmehr auf die OD-Nachfrage der Passagiere fokussiert<sup>147</sup>.

Im Gegensatz dazu ist der Flugplan eines Flughafens eine Mischung aus verschiedenen Flugplänen der Fluggesellschaften und legt eine Zeitnische (*Slot*) fest, wann es einer Fluggesellschaft erlaubt ist, an einem Flughafen zu landen bzw. zu starten. Weiterhin sind der Ziel-/Startflughafen und der genutzte LFZ-Typ wichtige Bestandteile eines Flugplans aus Sicht des Flughafens. Das Ziel des Flughafens ist, die optimale Ausnutzung seiner Infrastruktur und somit die eigene Gewinnmaximierung. Welche Fluggesellschaft den Slot nutzt, ist zweitrangig. In diesem Zusammenhang entwickelten *Wenzel et al.* [167] eine Modellkette um einen Flugplan für den Flughafen *Hamburg* abzuleiten. Basierend auf der OD-Passagiernachfrage und der Prognose der zukünftigen Flugbewegungen (FoAM, siehe Kapitel 3.4.2) wird ein zukünftiger Flugplan bestimmt, der durch kapazitive Beschränkungen angepasst wird. Schließlich generierten *Wenzel et al.* Flugpläne, die eine hohe Übereinstimmung mit realen Flugplänen des Flughafens *Hamburg* haben.

Übersteigt die Nachfrage nach Zeitnischen die Flughafenkapazität, müssen die Slots durch einen unabhängigen Koordinator zugewiesen werden. Flughäfen gelten dann als *koordiniert*. Das Verfahren ist in der Verordnung (EWG) Nr. 95/93 geregelt. Mit dem Vorschlag KOM(2011) 827 wurden die gemeinsamen Regeln für die Zuweisung von Zeitnischen auf Flughäfen überarbeitet, um die Flughafenkapazität besser auszunutzen, den Wettbewerb zu erhöhen und um Neubewerbern den Eintritt zu erleichtern. Eine Neuerung ist die Anhebung der Schwelle zur Vorrangbehandlung, auch *Großvaterrechte* genannt. Eine Fluggesellschaft wird bei der Zuweisung von Slots in der Folgeperiode bevorzugt, wenn sie mindestens 85 % (bisher 80 %) ihrer Slots in der vergangenen Periode genutzt hat<sup>148</sup>. Weiterhin erhöht sich eine Abfolge von Slots von bisher 5 Slots auf 15 Slots in der Sommerflugplanperiode bzw. 10 Slots in der

---

<sup>147</sup> *Operations Research* Methoden und mathematische Modelle werden heutzutage eingesetzt um Fragestellungen zur Flugplanung von Fluggesellschaften zu lösen. Siehe hierzu unter anderem [165, 166].

<sup>148</sup> Es gibt bestimmte Ausnahmen, wo beispielsweise die Terminalkapazität (Flughafen *Berlin Tegel*, TXL) oder die Anzahl der LFZ-Abstellpositionen der limitierende Faktor ist.

Winterflugplanperiode in aufeinanderfolgenden Wochen. Zusätzlich können jetzt Slots auch zwischen zwei beliebigen Fluggesellschaften getauscht werden.

Laut *Zentrum für Europäische Politik* ergeben sich dadurch aber nicht nur Vorteile. Zwar erleichtere die Erhöhung der Anzahl für eine Slot-Abfolge Neubewerbern den Zugang, gleichzeitig werden aber Fluggesellschaften mit kleinem Marktanteil gegenüber Fluggesellschaften mit großem Marktanteil benachteiligt. Letztere können die größere Anzahl an Slots leicht bedienen. Kleinere Fluggesellschaften, die z. B. nur saisonale Stoßzeiten bedienen, können diese Flüge nicht dauerhaft zu den gewünschten Zeiten anbieten. Somit sinkt wiederum der Wettbewerb. Des Weiteren erschwert die Erhöhung auf 15 Slots bzw. 10 Slots die Planungssicherheit der Fluggesellschaften und die Möglichkeit zur Reaktion auf kurzfristige Nachfrageschwankungen, was wiederum die Kostensenkungsmöglichkeiten mindert. [168]

#### 4.5.2 Start- und Landebahnsystem




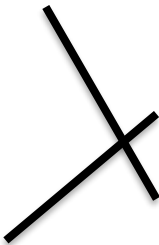

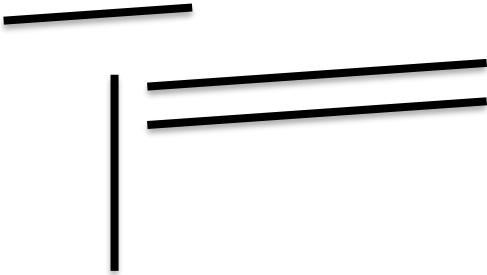
Die Anzahl und Lage der Start- und Landebahnen bestimmt maßgeblich die SLB-Kapazität eines Flughafens (siehe Kapitel 4.5.3). Ausgerichtet sind diese an den örtlich vorherrschenden Windverhältnissen, so dass ein Benutzungsfaktor des Flugplatzes von mind. 95 % für LFZ vorherrscht, für die der Flugplatz bestimmt ist. Tabelle 4-15 listet typische SLB-Layouts auf.

Die einfachste Konfiguration ist das Einbahnsystem, gefolgt von dem Parallelbahnsystem mit mindestens 2 SLB, die die gleiche geografische Ausrichtung besitzen. Der Abstand zwischen den Bahnmittellinien entscheidet über die Art des Betriebs des Parallelbahnsystems. Beträgt der Abstand weniger als 1 035 m können diese Bahnen beim gleichzeitigen Anflug von 2 LFZ nicht unabhängig voneinander betrieben werden. Ein unabhängiger Landebetrieb ist erst bei einem größeren Abstand möglich.

Ein weiteres SLB-Layout ist das Kreuzbahnsystem. Die SLB sind in unterschiedliche geografische Richtungen ausgerichtet und schneiden sich an einem Punkt. Diese Konfiguration wird gewählt, wenn lokale Winde aus unterschiedlichen Richtungen vorherrschen. Somit kann unter ungünstigen Windbedingungen der Flugbetrieb unter Nutzung einer Bahn aufrechterhalten werden.

Bei geringen Windstärken können beide Bahnen genutzt werden. Ähnlich diesem Layout ist das konvergierende Bahnsystem. Auch hierbei zeigen die Bahnen in unterschiedliche geografische Richtungen, kreuzen sich jedoch nicht. Die Kapazität ist geringfügig größer als beim Kreuzbahnsystem und davon abhängig, ob die Flüge vom V wegführen (*Diverging Pattern*) oder in das V einfliegen (*Converging Pattern*). Wenn ein Flughafen mindestens 4 oder mehr SLB besitzt wird dies in dieser Arbeit als Mehrbahnsystem bezeichnet. [35] S. 369

**Tabelle 4-15: Start- und Landebahn-Layouts.**

Typ	Layout
Einbahnsystem	
Parallelbahnsystem, abhängig	
Parallelbahnsystem, unabhängig <sup>149</sup>	
Kreuzbahnsystem	
Konvergierendes Bahnsystem	
Mehrbahnsystem	

<sup>149</sup> Ein Abstand der Mittellinien von 1 035 m ist für voneinander unabhängige, parallele Anflüge, von 915 m ist für voneinander abhängige, parallele Anflüge und von 760 m ist für voneinander unabhängige, parallele Abflüge von Nöten (Annahme: Bahnschwellen auf gleicher Höhe) [48], [169].

**Tabelle 4-16: Vorherrschende SLB-Anordnung und Art des Betriebs pro Flughafenklasse.**

Flughafenklasse	SLB-Anordnung/Betrieb
<i>Internationale FH</i>	parallel/unabhängig
<i>Große Regional-FH</i>	kreuzend/abhängig
<i>Kleine Regional-FH</i>	Einbahnsystem
<i>Fracht-Hub-FH</i>	parallel/unabhängig
<i>Internationale Hub-FH</i>	parallel/unabhängig
<i>Hochfrequenz-Hub-FH</i>	Mehrbahnsystem/unabhängig
<i>Sekundäre Hub-FH</i>	parallel/unabhängig

Tabelle 4-16 listet die am häufigsten vorherrschende SLB-Anordnung sowie die Art des Betriebes pro Flughafenklasse (siehe Kapitel 4.2.5) auf. Bei der Bestimmung für jeden Einzelflughafen wird jedem das Layout zugeordnet, das die höchstmögliche SLB-Kapazität besitzt. Das heißt, besitzt ein Flughafen 3 SLB, wovon zwei parallel ausgerichtet sind und die dritte SLB eine der anderen Bahn kreuzt, ist dieser Flughafen mit einem Parallelbahnsystem ausgestattet.

#### 4.5.3 Start- und Landebahnpkapazität

Die Kapazität des SLB-Systems ist in vielen Fällen der limitierende Faktor der Gesamtkapazität eines Flughafens. Zahlreiche Faktoren beeinflussen die SLB-Kapazität, unter anderem

- die Anzahl der SLB,
- der SLB-Betrieb (abhängig/unabhängig),
- die Art der operierenden LFZ-Muster (Verkehrsmix),
- das praktizierte An-/Abflugverfahren,
- die Bahnnutzungsstrategie,
- die verwendeten Flugregeln (VFR, IFR<sup>150</sup>),
- die Art der Navigationshilfen und
- die meteorologischen Bedingungen.

Unterschieden wird zwischen der *praktischen Kapazität* und der *Sättigungskapazität* des SLB-Systems. Erstere wird als operative Leistungsgrenze eines Flughafens ausgewiesen, bei der ein definierter Qualitätsstandard, z. B. eine durchschnittliche Verzögerung von 4 min, eingehalten wird. Die praktische Kapazität gibt demnach die Anzahl an möglichen Flugbewegungen an, die im täglichen Betrieb eines Flughafens pro Stunde abgefertigt werden können. Die Sättigungskapazität, auch technische Kapazität genannt, beschreibt den Punkt, an dem die mittlere Verzögerung gegen unendlich geht, ohne dass der Verkehrsdurchsatz gesteigert werden kann. Die Berechnung beruht auf der Annahme eines kontinuierlichen Flugbewegungsflusses. Dieser ist in der Praxis nicht gegeben, so dass es sich hierbei nur um eine theoretische Größe handelt.

Die Erfassung der Daten ist aufgrund der zeitlichen Dynamik all dieser Faktoren für jeden einzelnen Flughafen kaum möglich. Somit wird in dieser Arbeit auf bewährte Ansätze zur

<sup>150</sup> VFR: *Visual Flight Rules*, IFR: *Instrument Flight Rules*.

Bestimmung der stündlichen Kapazität des SLB-Systems zurückgegriffen, die in erster Näherung einen guten Kapazitätswert liefern.

Die in dieser Arbeit verwendete Methode ist die FAA-RD-74-124 „*Techniques for Determining Airport Airside Capacity and Delay*“, welche ein grafischer Ansatz basierend auf empirischen Regressionen ist [170] S. 40 ff. Zunächst wird der stündliche Kapazitätsbasiswert ( $C^*$ ) mit Hilfe der Abbildungen 2-3 bis 2-64 in [170] bestimmt. Dieser beruht einerseits auf dem sogenannten *Mix Index* (MI), der sich aus Formel (4.3) ergibt.

$$MI [\%] = C + 3D \quad (4.3)$$

$C$  ist dabei der Anteil der LFZ am Verkehrsmix mit einer MTOM zwischen 12 500 lb<sup>151</sup> und 300 000 lb. Dies entspricht etwa der Wirbelschleppenkatgorie *Medium* (M).  $D$  ergibt sich aus dem Anteil aller LFZ am Verkehrsmix mit einer MTOM über 300 000 lb. Entsprechend werden alle LFZ der Wirbelschleppenkatgorien *Heavy* (H) und *Super* (S) eingeordnet. Andererseits wird der Anteil der Abflüge am Verkehrsmix zur Bestimmung des stündlichen Kapazitätsbasiswerts ( $C^*$ ) benötigt.

Die stündliche Kapazität der SLB wird anschließend gemäß Formel (4.4) abgeschätzt, wobei der stündliche Kapazitätsbasiswert  $C^*$  mit einem Durchstartfaktor<sup>152</sup>  $T$  und einem Abrollfaktor<sup>153</sup>  $E$  multipliziert wird. Die beiden Faktoren  $T$  und  $E$  sind ebenfalls den entsprechenden Abbildungen 2-3 bis 2-64 in FAA-RD-74-124 zu entnehmen [170] S. 94 ff.

$$\text{Stündliche Kapazität} \left[ \frac{LFZ}{h} \right] = C^* * T * E \quad (4.4)$$

Ein ausführliches Beispiel zur Abschätzung der stündlichen Kapazität eines SLB-Systems ist in Kapitel 8.6.1 (Anhang F) aufgeführt.

Die konkreten Kapazitätswerte für die SLB-Anordnung der einzelnen Flughafenklassen sowie Variationen davon (veränderter Verkehrsmix, andere SLB-Anordnung) sind im Anhang F zu finden. Für die Bestimmung der SLB-Kapazität des Mehrbahnsystems kann jedoch nicht auf diese Methode zurückgegriffen werden. Einerseits weist die FAA-RD-74-124 nur Vorlagen bis zu einem Parallelbahnsystem mit 4 SLB aus. Andererseits verliert diese Methode an Genauigkeit je größer die Anzahl der SLB wird, da hierdurch die Komplexität des SLB-Systems steigt. Dadurch wird für den Cluster der *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* auf reale Kapazitätswerte der vier Clusterelemente (ATL, DEN, DTW, ORD) zurückgegriffen [171]. Im Durchschnitt können unter IFR-Bedingungen bei Flughäfen dieser Klasse 183 Flugbewegungen pro Stunde abgefertigt werden.

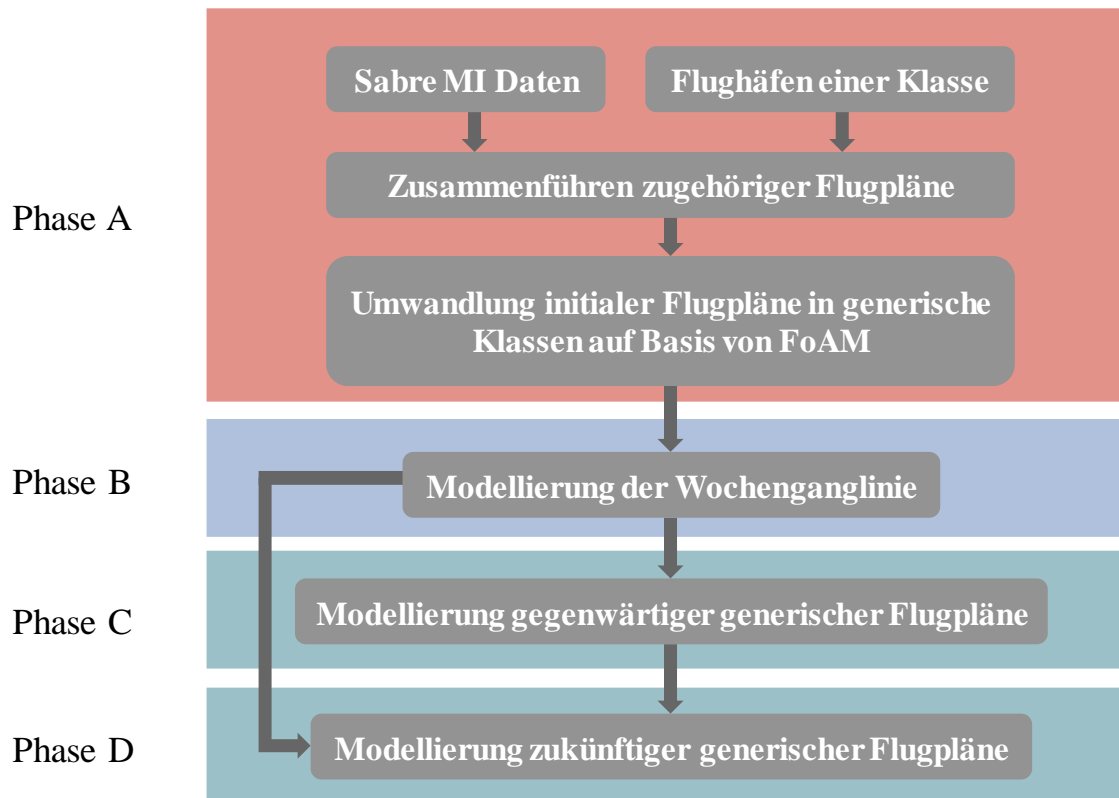
#### 4.5.4 Schrittweise Modellierung von generischen Flugplänen

Die fundamentale Methodik zur Modellierung generischer Flugpläne wird *Builder of Generic Schedules* (BoGS) genannt und unterteilt sich in vier Phasen. Ausgangspunkt bilden reale Flugpläne [7] der 241 Flughäfen (Elemente), die in Kapitel 4.1 zur Modellierung der Flughafenklassen verwendet werden. Diese werden nach bestimmten, durch den Nutzer auszuwähl-

<sup>151</sup> 1 lb = 0,454 kg.

<sup>152</sup> *Touch & Go Factor*.

<sup>153</sup> *Exit Factor*.

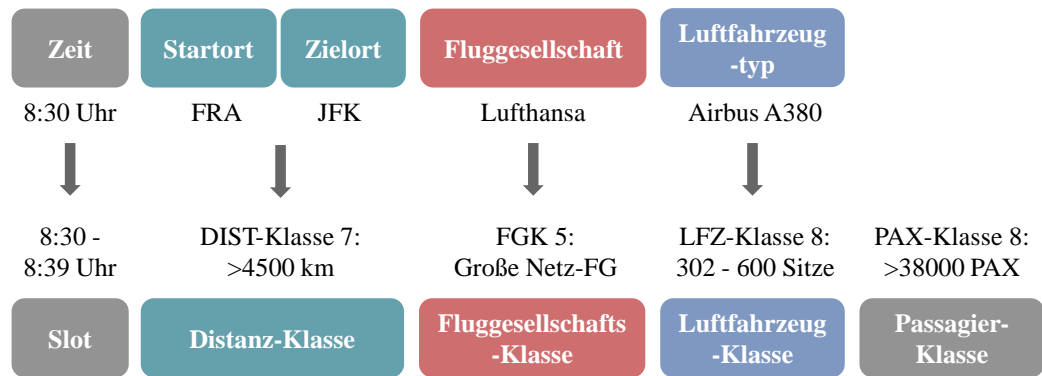


**Abbildung 4-25: Phasenablaufdiagramm der Modellierung von generischen Flugplänen.**

enden Anforderungen zusammengeführt, gefiltert und in generische Klassen überführt (Phase A). Hier wird auf die in Kapitel 3.4.2 dargestellte Klassifizierung des FoAM-Modells zurückgegriffen. Im zweiten Schritt (Phase B) erfolgt die Bestimmung der Wochenganglinie unter Nutzung geläufiger Wahrscheinlichkeitsfunktionen (vgl. Kapitel 3.3.1). Phase C umfasst die finale Modellierung des gegenwärtigen Flugplans (hier 2012). Abschließend kann in Phase D ebenso ein zukünftiger Flugplan mit Hilfe des Algorithmus erzeugt werden, welcher auf den Ergebnissen aus Phase B aufbaut. Eine grafische Übersicht des Algorithmus ist in Abbildung 4-25 dargestellt.

#### **4.5.4.1 Datenzusammenführung und Umwandlung in generische Klassen**

Phase A kann als Datenverarbeitungsprozess zusammengefasst werden, mit dem Ziel die relevanten Flugplandaten zu extrahieren. Erster Schritt innerhalb von Phase A ist das Filtern der realen Flugpläne und Segmente, die für die aktuelle Analyse benötigt werden und sich aus typischen Eigenschaften von Flugplänen ableiten. Der Algorithmus (respektive der Benutzer) unterscheidet zwischen der Flughafenklasse, also einer bestimmten Anzahl an Flughäfen, einer Zeit, das heißt Sommer- (1. April - 31. Oktober) bzw. Winterflugplan (1. November - 31. März) und der Art des Fluges, also ob Abflüge oder Ankünfte betrachtet werden. Die Flughafenklassen sind kongruent zu den in Kapitel 4.2.5 aufgezeigten Klassen. Des Weiteren wird von einem Nachtflugverbot ausgegangen, das heißt, es werden nur Flüge betrachtet die zwischen 6:00 Uhr und 22:00 Uhr Ortszeit stattfinden. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da an Flughäfen in verschiedenen Weltregionen teilweise auch nachts eine hohe Anzahl an Flugbewegungen zu verzeichnen ist. Eine Vermischung von Flugplänen mit und ohne Nachtflugverbot würde aber zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Abschließend können verschiedene Zeitfenster betrachtet werden. Ein 10-minütiges Zeitfenster stellt den Standard dar. Jedoch ist dieser bei Flughäfen mit geringem Flugbewegungsaufkommen nicht sinnvoll, so dass größere Zeitfenster (15 min, 20 min bzw. 30 min) ausgewählt werden können.



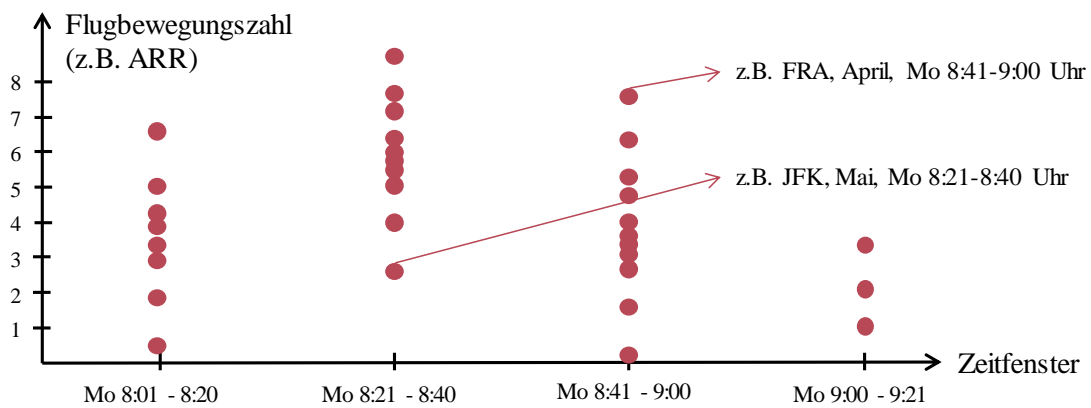
**Abbildung 4-26: Beispiel zur Umwandlung der Flugplaninformationen in generische Klassen.**

Im Anschluss an das Filtern der Daten erfolgt die Umwandlung der einzelnen, realen Flugplaninformationen in generische Attribute. Abbildung 4-26 veranschaulicht diesen Prozess grafisch und führt gleichzeitig auch ein Beispiel auf. Die Abflugs-/Ankunftszeit wird einem Zeitfenster zugeordnet. Weiterhin werden die Intervalldefinitionen des FoAM-Algorithmus (vgl. Kapitel 3.4.2) genutzt um den LFZ-Typ in eine LFZ-Klasse und die OD-Information in eine Distanz-Klasse umzuwandeln sowie dem Segment eine Passagier-Klasse zuzuweisen. Das heißt, da ein Referenzflughafen weltweit verortet werden kann, entfällt die exakte OD-Information. Darüber hinaus erfolgt die Umwandlung der realen Information über die Fluggesellschaft in eine generische Fluggesellschaftsklasse, kongruent zu den in Kapitel 4.3.4 eingeführten Klassen. Schließlich liegt am Ende vom Phase A eine Liste von Flügen mit generischen Klassen vor, die die Ausgangsbasis für die weiteren Phasen bildet.

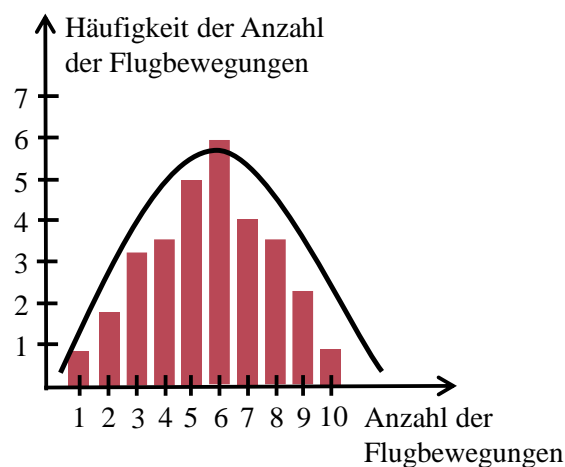
#### 4.5.4.2 Wochenganglinie der Flugbewegungen

Gemäß der Auswahl aus Phase A erfolgt in Phase B die Bestimmung der Wochenganglinie. Zunächst wird die Anzahl der Flugbewegungen innerhalb eines Zeitfensters für alle Klassenrepräsentanten überlagert, was Abbildung 4-27 veranschaulicht. Jeder Punkt stellt die Flugbewegungen pro Zeitfenster und Woche (Montag bis Sonntag) eines Flughafens dar. 8 LFZ starten z. B. am Flughafen *Frankfurt/Main* (FRA), in einer Februarwoche, innerhalb des Zeitfensters am Montag 8:41 Uhr - 9:00 Uhr. Die Zeitfenster aller Flughäfen einer Flughafenklasse werden erfasst.

Für jedes einzelne Zeitfenster liegt somit eine Häufigkeitsverteilung von Flugbewegungszahlen vor. Um nun eine möglichst präzise Wochenganglinie zu erhalten, wird geprüft, inwieweit jedes einzelne Zeitfenster mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert werden kann, wofür der *Chi-Quadrat* Anpassungstest (siehe Kapitel 3.3.2.2) herangezogen wird. Es wird angenommen, dass Flughäfen innerhalb einer Klasse auch einen ähnlichen Flugbetrieb haben, so dass sich die Flugbewegungszahl innerhalb eines Zeitfensters um den Mittelwert häufen (siehe Abbildung 4-28).



**Abbildung 4-27: Exemplarische Überlagerung der Flugbewegungen aller Flughäfen einer Flughafenklasse.**



**Abbildung 4-28: Exemplarische Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Flugbewegungen innerhalb eines Zeitfensters.**

Deshalb wird zuerst auf eine *Gauß*-Verteilung<sup>154</sup> geprüft. Wenn diese Nullhypothese vom *Chi-Quadrat* Test abgelehnt wird, also keine *Gauß*-Verteilung vorliegt, wird als nächstes eine mögliche Schiefe der Verteilung geprüft. Diese Eigenschaft kann bei Klassen mit kleineren Flughäfen und Klassen mit einer hohen Anzahl an Elementen vorkommen. Eine *Weibull*-Verteilung (siehe Kapitel 3.3.1) approximiert asymmetrische Verteilungen bei entsprechender Wahl des Skalierungsparameters ( $\alpha$ ) bzw. Formparameters ( $\lambda$ ). Hier wird sie zur Modellierung von linksschiefen Verteilungen eingesetzt. Rechtsschiefe Verteilungen werden hingegen mit Hilfe von Exponentialverteilungen abgebildet. Die vierte Option ist die Prüfung auf eine Gleichverteilung der Frequenzen. Falls alle vier Verteilungsfunktionen vom *Chi-Quadrat* Test abgelehnt werden, wird als Rückfalloption eine gezwungene Normalverteilung angenommen. Dies stellt aber nur den schlechtesten aller Fälle dar und würde nicht für ein sinnvolles Clustern sprechen, da keine Häufung der Frequenzen gefunden werden konnte. Im Umkehrschluss würde dieser Fakt bedeuten, dass die Flughäfen einer Klasse unterschiedliche operationelle Flugbetriebe haben.

Kritisch zu beobachten ist die Stichprobengröße, da immer nur ein gewisser Anteil an Flügen

<sup>154</sup> Die Formeln der Dichte- und Verteilungsfunktionen für die erwähnten Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind in Kapitel 3.3.1 aufgeführt.



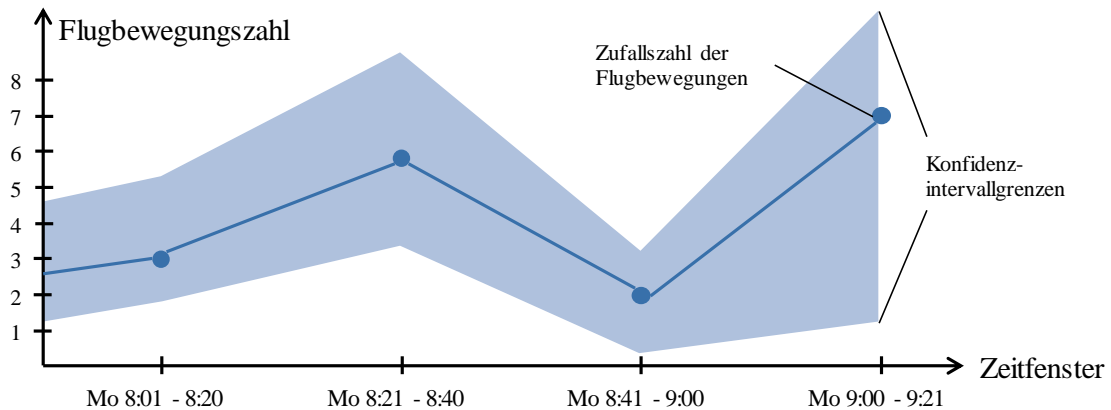


Abbildung 4-29: Exemplarische Wochenganglinie für eine Flughafenklasse.

des gesamten Flugplans in die aktuelle Analyse eingebunden wird. Somit ist darauf zu achten, wie groß die Stichprobe ausfällt und noch adäquate Ergebnisse erzeugt werden können.

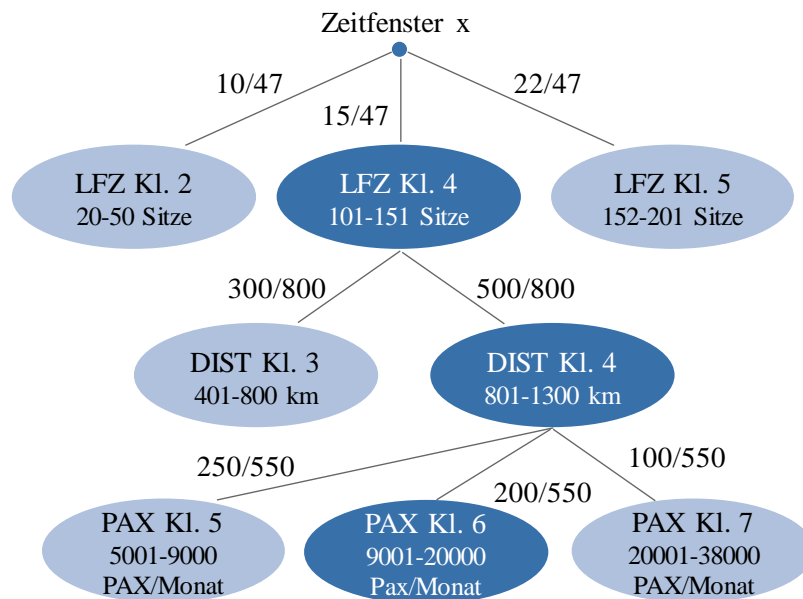
Schließlich mündet Phase B in der Bestimmung einer Zufallszahl, welche die Frequenz pro Zeitfenster der Wochenganglinie darstellt. Abbildung 4-29 zeigt dies exemplarisch. Die diskrete Kurve wird zusätzlich durch eine obere und untere Konfidenzintervallgrenze (siehe Kapitel 3.3.1) umschlossen.

#### 4.5.4.3 Entwicklung generischer Flugpläne

Phase C umfasst die Zuordnung von passenden Flügen aus dem sortierten Flugplan (Phase A) zu den ermittelten Frequenzen (Phase B). Die Herausforderung besteht darin, dass die Flugpläne im Sinne eines Zufallsexperiments für jeden Fall individuell erstellt werden können, jedoch in ihrer Grundgesamtheit, in Bezug auf die realen Flugpläne, kein verfälschtes Ergebnis liefern. Anderes gesagt ist das Ziel, ein mögliches Ergebnis zu finden, aber nicht unbedingt ein optimales. Diese zufällige Verteilung von Flugbewegungen respektive deren Charakteristika wurde auch von *Ashford et al.* [172] beobachtet. Obwohl Flüge eindeutig zeitlich terminiert sind, zeigt sich in der Praxis, dass zwischen der erwarteten und der tatsächlichen Start-/Landezeit eine relativ große Diskrepanz liegt und somit Flugbewegungen an einem Flughafen weniger regulär sind.

Der Algorithmus aus Phase C basiert auf dem Urnenmodell, das in der Wahrscheinlichkeitstheorie geläufig ist. Für jede Klasse (LFZ, Distanz, Passagier) wird zunächst ein Datenpool, respektive eine Urne, gebildet. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses berechnet sich nach Formel (3.33) und ist dementsprechend der relative Anteil an der Gesamtmenge pro Urne. Der Algorithmus beginnt mit der Bestimmung der LFZ-Klasse. Es wird angenommen, dass LFZ-Klassen ausschließlich in jenen Zeitfenstern auftreten, in denen sie auch im realen Flugplan vorkommen<sup>155</sup>. Im Gegensatz dazu können die Distanz- und Passagier-Klasse zufällig auf Basis des Datenpools der gesamten Woche zugeordnet werden, weil sich durch die Zuordnung der LFZ-Klasse automatisch Restriktionen ergeben und somit keine anderweitigen Einschränkungen getätigt werden müssen. Abbildung 4-30 und ein Beispiel veranschaulichen das Vorgehen bei der Erstellung passender Flüge.

<sup>155</sup> Diese Annahme zielt vor allem auf Flugpläne von *Hub*-Flughäfen ab, deren Flugplan aufgrund der Funktion als Umsteigepunkt in Wellen angelegt ist. Typischerweise erfolgt eine Unterscheidung in Spitzen in denen *Feeder*-Flüge ankommen/abfliegen und Spitzen von Flugbewegungen mit Großraumflugzeugen. Weiterhin kommen Flüge aus bestimmten Weltregionen zu bestimmten Zeiten an bzw. fliegen zu bestimmten Zeiten wieder ab [47] S. 394 ff.



**Abbildung 4-30: Exemplarischer Entscheidungsbaum zur Bestimmung eines Fluges.**

*Beispiel:*

*Ebene 1: Eine Urne enthält 47 Flüge aus 3 LFZ-Klassen. Die Wahrscheinlichkeiten sind 10/47 für Klasse 2, 15/47 für Klasse 4 und 22/47 für Klasse 5. Die Wahl von Klasse 5 ist am wahrscheinlichsten, beispielhaft wird hier aber Klasse 4 gewählt. Ebene 2: LFZ-Klasse 4 fliegt innerhalb einer Woche 300-mal über eine Distanz von 401 - 800 km (Klasse 3) und 500 mal 801 - 1300 km. Exemplarisch wird Distanz-Klasse 4 gewählt. Ebene 3: Über eine Woche wird ein Passagiervolumen registriert, was 250-mal zu Klasse 5, 200-mal zu Klasse 6 und 100-mal zu Klasse 7 passt. Beispielhaft wird Klasse 6 ausgewählt.*

Eine FGK wird parallel zu diesem Prozess in Abhängigkeit der LFZ-Klasse hinzugefügt. Somit kann der Algorithmus auf variierende Flottenstärken eingehen, indem die Menge jeder einzelnen LFZ-Klasse, die von einer Fluggesellschaft genutzt wird, anpassbar ist.

*Beispiel:*

*LFZ-Klasse 4 wird ausgewählt. Über die Woche nutzt in 200 Fällen Fluggesellschaftsklasse 5 und in 100 Fällen Fluggesellschaftsklasse 2 diese LFZ-Klasse. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Fluggesellschaftsklassen betragen 200/300 (FGK 5) und 100/300 (FGK 2).*

Schlussendlich besteht ein Flug aus einem Quadrupel, der aus LFZ-Klasse, Distanz-Klasse, Passagier-Klasse und Fluggesellschaftsklasse zusammengesetzt ist.

Nach der Bestimmung der Flüge werden diese den Frequenzen aus Phase B in zufälliger Weise zugeordnet. Da keine realen Segmente<sup>156</sup> mehr existieren, stellt jedes Segment nun einen *Container* dar, der durch die jeweilige Distanz- und Passagier-Klasse definiert ist. Der erste zufällig gebildete Flug repräsentiert dabei die Grundlage des Containers. Dadurch wird gleichzeitig durch die Passagier-Klasse ein Intervall festgelegt, dass das zu transportierende

<sup>156</sup> Die OD-Information wird absichtlich verworfen.

Passagiervolumen pro Monat darstellt. Infolgedessen füllt sich der Container solange mit Flügen, bis der Inhalt mit den Grenzen der FoAM Passagier-Klasse übereinstimmt. Der Passagierzuwachs pro Flug ist das Produkt des SLF, der oberen/unteren Kapazitätsgrenze der LFZ-Klasse (gemessen in Sitzplätzen) und dem Faktor 4,37, welcher die durchschnittliche Anzahl an Wochentagen pro Monat darstellt (gültig für Sommer- und Winterflugplanperiode).

$$\text{Passagierzuwachs}_{\max/\min} = \text{SLF} * \text{Sitzplatzkapazität}_{\min/\max} * 4,37 \quad (4.5)$$

*Beispiel:*

*Erster zugeordneter Flug eines Containers gehört zu LFZ-Klasse 4, Distanz-Klasse 4 und Passagier-Klasse 6. Dadurch muss das Passagiervolumen des Containers zwischen 9 001 und 20 000 Passagieren liegen. Nach Formel (4.5) beträgt der minimale Passagierzuwachs 296 Passagiere und der maximale Passagierzuwachs 442 Passagiere, bei einem angenommenen SLF von 67 %. Die maximale Anzahl an Slots pro Container ist gleich 960 [min pro Woche] geteilt durch Größe des Zeitfensters [min].*

Ein weiterer elementarerer Bestandteil eines Flugplans, der beachtet werden soll, ist die Regelmäßigkeit von Flugplänen. Flüge wiederholen sich, idealerweise im selben Zeitfenster über die gesamte Woche. Um dies zu berücksichtigen, generiert der Algorithmus beim Füllprozess mit Hilfe einer Matrix (siehe Abbildung 4-31) Flüge mit identischer LFZ-Klasse, wobei verschiedene Zeitfenster herangezogen werden (rot markierte Felder in Abbildung 4-31, hier beispielhaft LFZ-Klasse 4). Nicht genutzte LFZ-Klassen werden am Ende der Tabelle wieder hinzugefügt (markiert mit einem \*). Das Hinzufügen der neuen Reihen gewährleistet, dass keine Flüge verloren gehen und nur im schlechtesten Fall Flüge eines Segments mehrfach innerhalb eines Zeitfensters auftreten. Das Segment wird zunächst als voll betrachtet, wenn das Passagiervolumen die untere Grenze der Passagier-Klasse überschreitet. Wenn kein neuer Segment-Container initialisiert werden kann, erfolgt die Zuordnung der restlichen Flüge zu den bereits implementierten Containern, wobei die obere Grenze der Passagier-Klasse beachtet wird.

Slot\ Wochentag	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
19	4	3	2	4	4	4	4
.	.	.	.	.	.	.	.
41	2	4	3	3	4	2	2
2	3	2	4	3	2	4	2
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
19*							
41*							
2*							
960/Slot- intervall	.	.	.	.	.	.	.

*Abbildung 4-31: Beispielmatrix der LFZ-Klasse pro Zeitfenster und Wochentag.*

#### 4.5.4.4 Prognose zukünftiger Flugpläne

Die letzte Phase des BoGS-Modells (Phase D) prognostiziert den aktuellen Flugplan für ein zukünftiges Szenario (z. B. das Jahr 2030). Die Prognose basiert auf den Flugfrequenzen pro Zeitfenster und der Datenbasis aus Phase B, erweitert um entsprechende FoAM Skalierungsfaktoren. Aus FoAM werden hierbei die zukünftige Flugfrequenz und die generischen Flugplanparameter pro Distanz- und Passagier-Klasse sowie der SLF pro Distanz-Klasse herangezogen. Die Flugfrequenz wird folgendermaßen angepasst:

$$\begin{aligned} \text{Frequenz}_{\text{neu}} \text{ Zeitfenster } x \\ = \text{Frequenz}_{\text{alt}} \text{ Zeitfenster } x * \frac{\text{Summe der Frequenzen}_{2030}}{\text{Summe der Frequenzen}_{2012}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Diese Anpassung der Frequenz führt zwangsläufig irgendwann zur kapazitiven Überlastung der Flughafeninfrastruktur<sup>157</sup>. Begrenzt wird die Kapazität in BoGS durch das typische SLB-Layout des Clusters. Hierfür werden die berechneten Werte aus Anhang F verwendet (vgl. Kapitel 4.5.3). Falls die Kapazität überschritten wird, verlagern sich die Frequenzen in das nächste freie Zeitfenster (vgl. Abbildung 4-32), ähnlich der Methodik die Wenzel *et al.* [167] verwenden.

Gleichzeitig entwickelt sich der SLF pro Distanz-Klasse nach Formel (4.7), überschreitet aber nie 90 %. Dabei wächst der SLF um 0,77 % pro Jahr. Dieser Wert entspricht dem empirisch ermittelten, durchschnittlichen Wachstum des weltweiten SLF von 2003 - 2012. Er wird in den Folgejahren um 0,01 % verringert, so dass sich eine asymptotische Annäherung an das Maximum einstellt. Dieses Verhalten wird durch den zweiten Summanden mathematisch umgesetzt. Im Anschluss an die Anpassung wird Phase C erneut ausgeführt, was in einem zukünftigen Flugplan mündet.

$$\begin{aligned} \text{SLF}_{\text{Jahr}, \text{DIST Kat}} \\ = \text{SLF}_{\text{Basisjahr}, \text{DIST Kat}} + (\text{Jahr} - \text{Basisjahr})^{158} * (0,0077 - 0,0001 \\ * (\text{Jahr} - \text{Basisjahr})) \end{aligned} \quad (4.7)$$

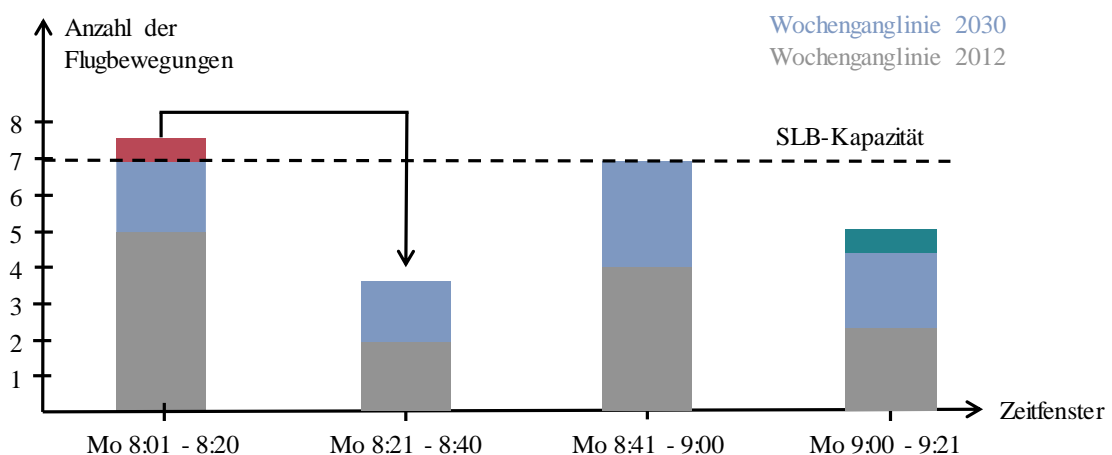


Abbildung 4-32: Verschieben der Flüge beim Überschreiten der SLB-Kapazität.

<sup>157</sup> Unter der Annahme, dass sich die Infrastruktur nicht verändert.

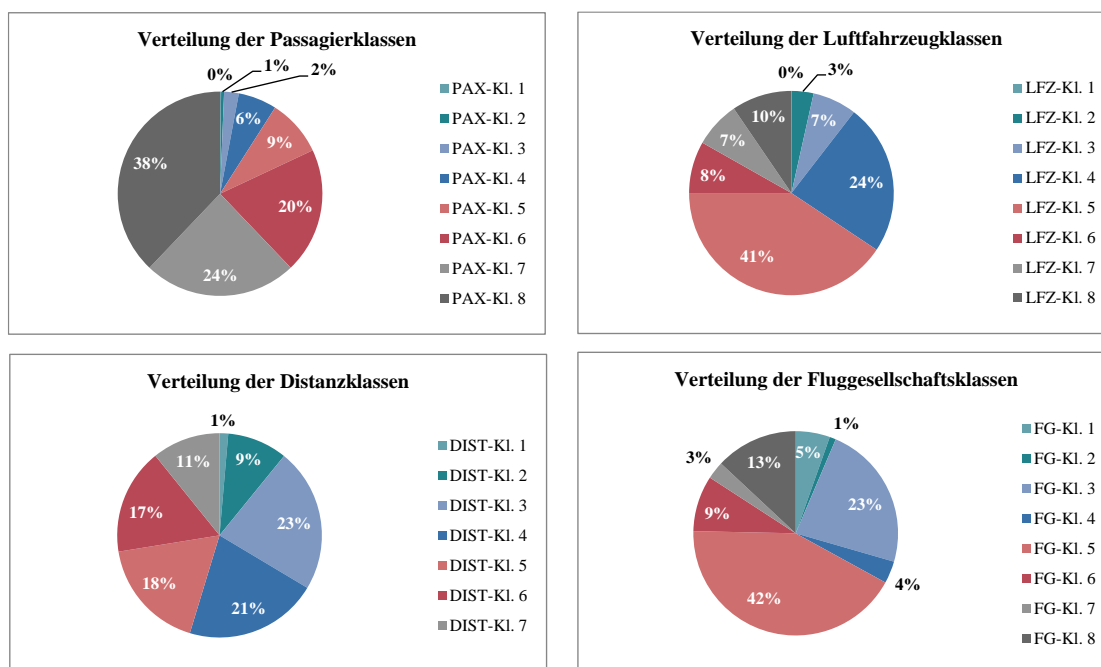
<sup>158</sup> Das Basisjahr ist hier 2012.

### 4.5.5 Ergebnisse der Modellierung generischer Flugpläne

Im Folgenden werden die Charakteristiken der generischen Flugpläne aufgezeigt und die angemessene Repräsentation von realen Flugplänen diskutiert. Zwei Szenarien werden beispielhaft näher betrachtet. Szenario I geht auf die *Internationalen Hub-Flughäfen* und Szenario II auf die *Internationalen Flughäfen* ein.

#### Szenario I: Internationale Hub-Flughäfen, Abflüge (DEP), Sommer

Abbildung 4-33 zeigt zunächst die reale Verteilung der Flugbewegungen nach Passagier-, Luftfahrzeug-, Distanz- und Fluggesellschaftsklassen für die *Internationalen Hub-Flughäfen*. Die Nummerierung der Klassen ist an die FoAM-Klassifizierung (siehe Kapitel 3.4.2) angelehnt. In Bezug auf die Passagier-Klassen zeigt sich ein typisches Bild für diese Klasse. Fast zwei Drittel der bedienten Segmente weisen über ein Jahr eine kumulierte Passagieranzahl von mehr als 20 000 Passagieren auf (PAX-Klasse 7 + 8). 20 % der Segmente haben Passagier-volumina zwischen 9 000 und 20 000 Passagieren. In Bezug auf die Größe der verkehrenden LFZ ist Klasse 5 (152 - 201 Sitzter) mit 41 % am häufigsten vertreten. Diese mittelgroßen LFZ werden als *Feeder* für Langstreckenflüge eingesetzt, die wiederum durch LFZ-Klasse 8 (> 302 Sitze) bedient werden. Der Anteil der LFZ-Klasse 8 liegt bei 10 %, der nur in der Klasse der *Fracht-Hub-Flughäfen* (13 %) übertroffen wird. Bei den Distanz-Klassen wird das gesamte Spektrum mit Ausnahme von Ultrakurzstrecken abgedeckt. Die Anteile bewegen sich zwischen 11 % und 23 %. Ebenfalls charakteristisch ist die Verteilung der Fluggesellschaftsklassen. Mehrheitlich (42 %) *Große-Netzfluggesellschaften* (FGK 5) operieren an diesen Flughäfen, gefolgt von *Kleinen Netzfluggesellschaften* mit 23 % (FGK 3). Die Anteile anderer Fluggesellschaftsklassen beziffern sich jeweils auf maximal 9 %.

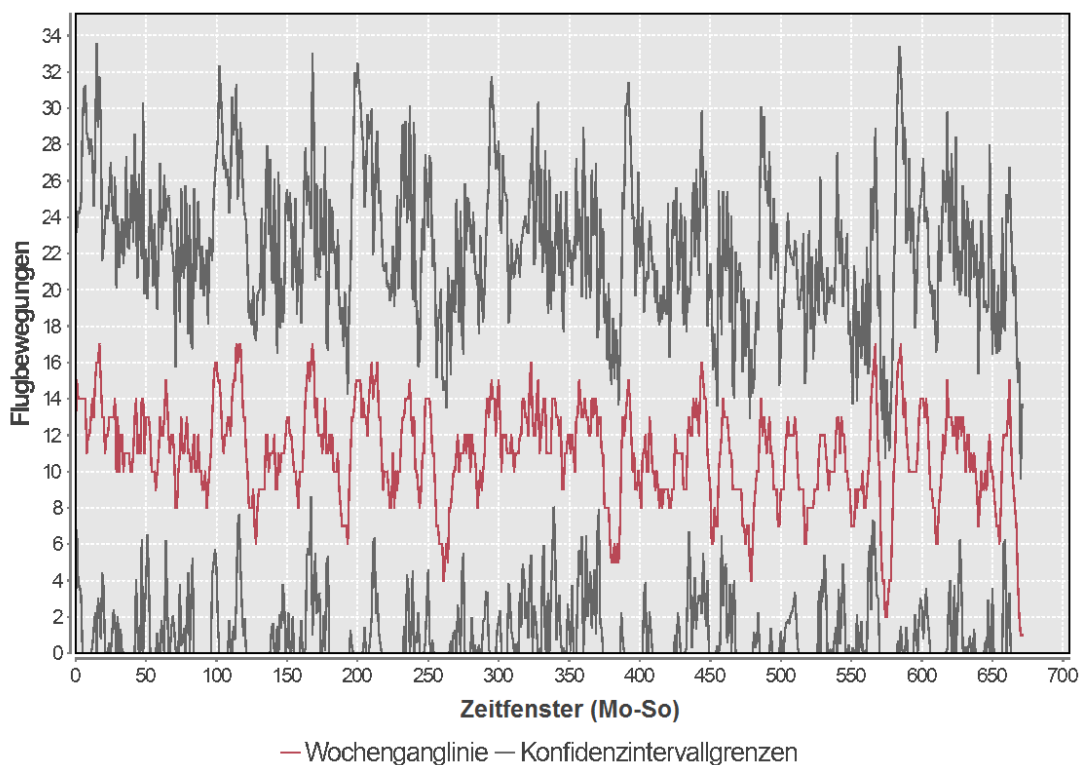


**Abbildung 4-33: Reale Verteilung der Flugbewegungen nach Passagier-, LFZ-, Distanz- und Fluggesellschaftsklassen<sup>159</sup> der Abflüge an Internationalen Hub-FH im Sommer.**

<sup>159</sup> Im Vergleich zu den in Kapitel 4.3 definierten sieben Fluggesellschaftsklassen sind hier acht Klassen aufgeführt. Klasse 8 spiegelt hier den Anteil der Fluggesellschaften wider, die bei der Clusteranalyse

Der nächste Schritt nach der Bestimmung der realen Verteilungen einzelner Klassen ist die Modellierung der Wochenganglinie. Abbildung 4-34 veranschaulicht die Wochenganglinie der Abflüge im Sommer für ein Zeitfenster von 10 min. Zur besseren Übersicht ist die Wochenganglinie als *gleitende Stunde* dargestellt, eine Methode zur Glättung der Datenpunkte. Einzelne Punkte werden durch das arithmetische Mittel der Nachbarpunkte über den Zeitraum einer Stunde dargestellt. Die rote Kurve zeigt die Flugbewegungen pro Zeitfenster über eine Woche (Montag - Sonntag) und die grauen Kurven markieren zusätzlich die Grenzen des oberen und unteren Konfidenzintervalls. Des Weiteren ist die Tagesganglinie für einen Montag in Abbildung 4-35 dargestellt, bei der auch die typische Wellenstruktur im Tagesverlauf bei *Hub-Flughäfen* gut erkennbar ist. Weitere Wochen- und Tagesganglinien der *Internationalen Hub-Flughäfen* sind im Anhang G zu finden.

Weiterhin wird eine generische Flugliste erstellt, die die modellierten Flüge für eine Woche beinhaltet. Ein Auszug der Liste ist in Tabelle 4-17 dargestellt. Der zweite Flug der Liste findet beispielsweise täglich von Montag bis Samstag im Zeitfenster 12:10 Uhr - 12:20 Uhr statt. Der Flug charakterisiert sich durch eine Fluggesellschaft aus Klasse 3 (*Kleine Netz-Fluggesellschaft*), ein LFZ der Klasse 2 (20 - 50 Sitzler), eine Distanz der Klasse 3 (401 - 800 km) und ein monatliches Passagieraufkommen der Klasse 7 (20 001 - 38 000 Passagiere). Auf Basis der generischen Flugplanliste kann im letzten Schritt ein zukünftiger, generischer Flugplan erstellt werden.



**Abbildung 4-34: Generische Wochenganglinie (Sommer, Zeitfenster: 10 min<sup>160</sup>, gleitende Stunde) der Abflüge der Internationalen Hub-Flughäfen.**

nicht eingebunden waren (als Beispiel sei hier die Fluggesellschaft *Germania* genannt) und somit keiner der anderen Klassen zugeordnet werden können.

<sup>160</sup> In Abhängigkeit des betrachteten Slot-Intervalls ergeben sich unterschiedlich viele Zeitslots. In dieser Abbildung sind es  $\frac{960 \text{ min}}{10 \text{ min}} * 7 \text{ Tage} = 672 \text{ Slots}$ . 960 Minuten entsprechen einer Betriebszeit von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr pro Wochentag. Die Nachstunden (zu denen keine Flugbewegungen stattfinden) sind in der Abbildung nicht dargestellt.



**Abbildung 4-35: Generische Tagesganglinie (Montag, Sommer, Zeitfenster: 10 min) der Abflüge der Internationalen Hub-Flughäfen.**

**Tabelle 4-17: Auszug aus der generischen Flugliste für Szenario I.**

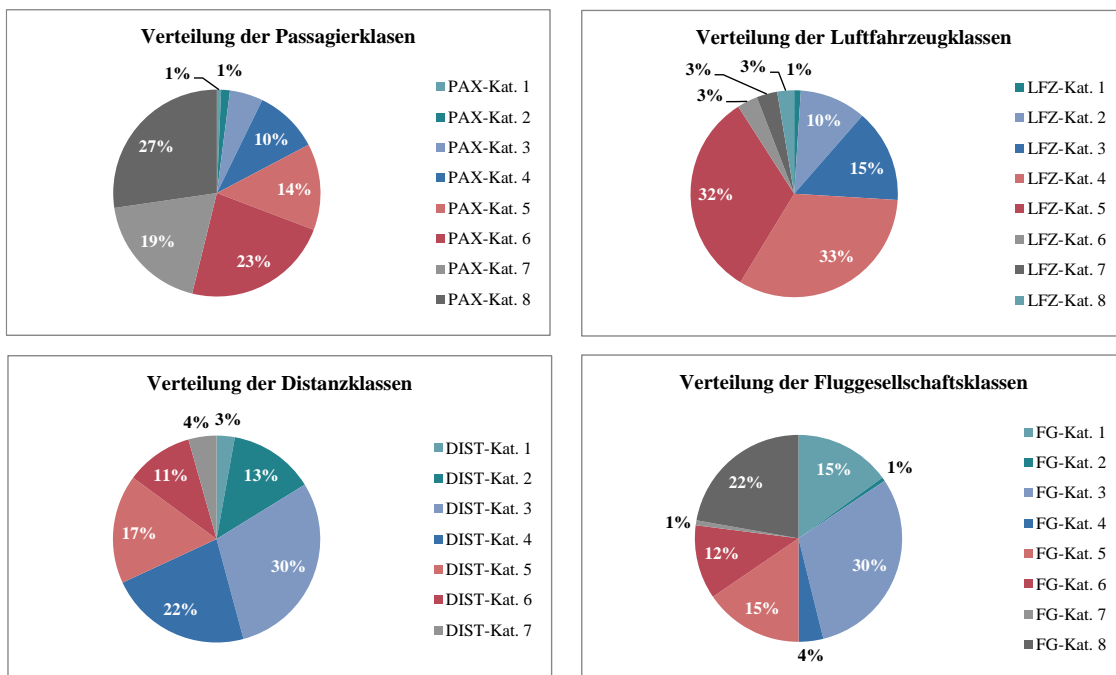
FG-Kl.	LFZ-Kl.	DIST-Kl.	PAX-Kl.	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Zeit
4	2	4	8	-	-	-	-	-	-	S	1150-1200
3	2	3	7	M	D	M	D	F	S	-	1210-1220
4	5	4	8	-	D	-	D	-	S	S	0850-0900
3	5	3	8	-	D	-	D	-	-	-	1200-1210
4	8	4	8	M	D	M	-	F	-	S	1500-1510
4	2	4	8	M	-	-	D	F	S	-	1340-1350
5	8	5	8	M	D	-	-	F	-	S	1300-1310
5	8	5	8	M	-	M	-	-	-	S	1400-1410
3	5	3	8	M	-	M	-	-	-	-	1600-1610
4	2	4	8	M	-	-	-	F	-	-	1220-1230
4	8	4	8	-	D	-	-	-	-	-	1400-1410
3	6	3	8	M	D	M	D	F	S	S	1020-1030

#### Scenario II: Internationale Flughäfen, Ankünfte (ARR), Winter

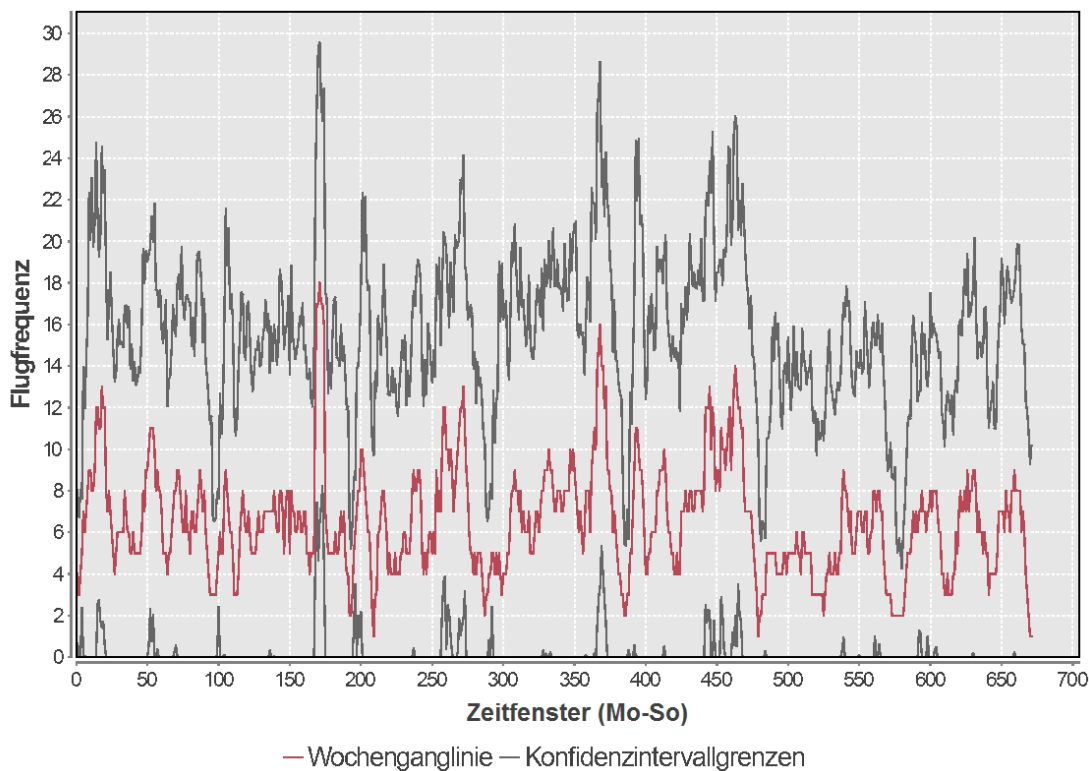
Abbildung 4-36 stellt die realen Verteilungen der einzelnen Klassen für die *Internationalen Flughäfen* dar. Im Vergleich zu den *Internationalen Hub-Flughäfen* sinken die beiden passagier volumenstärksten Klassen um 16 %. Im Gegensatz dazu werden auch passagierärmere Segmente mit ca. 2 500 und 9 000 Passagieren pro Jahr (PAX-Klasse 4 + 5) bedient. Dadurch werden gleichzeitig auch kleinere LFZ-Typen eingesetzt. Der Anteil der 20 - 50 Sitzter wächst auf 10 % und der 51 - 100 Sitzter auf 15 %. LFZ-Typen mit 202 und mehr Sitzen (LFZ-Klasse 6 - 8) sind nur noch mit 3 % an den *Internationalen Flughäfen* vertreten. Eine ähnliche Verteilung ist bei den Distanz-Klassen zu beobachten. Nur die Ultralangdistanzen (DIST-Klasse 6 + 7) gehen um ca. 8 % auf 11 % bzw. 4 % zurück. Bei den Fluggesellschafts-klassen wandelt sich das Bild jedoch deutlich. Am häufigsten vertreten sind an *Internationalen Flughäfen* zu fast einem Drittel *Kleine Netz-Fluggesellschaften* (FGK 3). Danach folgen die



*Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften (FGK 1) und die Große Netzfluggesellschaften (FGK 5) mit einem Anteil von jeweils 15 %. Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften, Regional-Fluggesellschaften und Langstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften sind so gut wie gar nicht vertreten.*



**Abbildung 4-36: Reale Verteilung der Flugbewegungen nach Passagier-, LFZ-, Distanz- und Fluggesellschaftsklassen der Ankünfte an Internationalen Flughäfen im Winter.**



**Abbildung 4-37: Generische Wochenganglinie (Winter, Zeitfenster: 10 min, gleitende Stunde) der Ankünfte der Internationalen Flughäfen.**



**Tabelle 4-18: Auszug aus der generischen Flugliste für Szenario II.**

Airline Cat	LFZ Cat	Dist Cat	PAX Cat	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Time
2	5	2	6	M	-	W	-	F	S	-	2020-2030
3	2	3	7	M	-	W	D	-	-	-	1310-1320
3	5	3	7	-	-	-	D	-	S	-	1620-1630
3	5	3	7	-	-	-	D	-	S	-	1650-1700
5	8	5	8	-	-	-	D	-	-	-	1330-1340
3	2	3	6	-	D	-	-	-	-	-	1140-1150
3	5	3	7	-	-	-	-	-	-	S	1020-1030
4	7	4	8	-	D	-	-	-	-	-	1330-1340
4	5	4	5	-	D	W	D	F	-	-	1910-1920
5	2	5	8	-	-	-	-	-	S	-	1200-1210
2	4	2	8	M	-	-	D	F	-	-	2010-2020

Abbildung 4-37 veranschaulicht die Wochenganglinie für Szenario II, das heißt die Ankünfte der *Internationalen Flughäfen* im Winter für ein Zeitfenster von 10 min. Im Vergleich zu den *Internationalen-Hub-Flughäfen* ist, wie zu erwarten, die Anzahl der durchschnittlichen Flugbewegungen Zeitfenster geringer. Die Flugbewegungen bewegen sich zwischen sechs und acht Abflügen. Weiterhin ist auffällig, dass beim Zeitfenster 175 eine hohe Anzahl von Abflügen modelliert wird. Hier wirkt sich die Nutzung von Zufallszahlen nachteilig auf das Ergebnis aus (vgl. Kapitel 4.5.6), da eine derart hohe Anzahl an Flugbewegungen unrealistisch für *Internationale Flughäfen* ist. Tabelle 4-18 zeigt wiederum einen Auszug aus der generischen Flugplanliste für Szenario II.

#### 4.5.6 Diskussion und Zusammenfassung

Die generische Flugplanmodellierung kann ebenso für alle verbliebenen Szenarien und Flughafenklassen durchgeführt werden. Es findet eine Verschiebung der relativen Anteile der Kategorien statt, da keine restriktive Zuordnung von Passagier- und Distanz-Kategorie pro Zeitfenster mehr erfolgt. Dadurch ist festzustellen, dass Kategorien mit einem hohen relativen Anteil in den empirischen Daten durch den Algorithmus verstärkt werden und eine dominante Position im generischen Flugplan einnehmen.

Weiterhin führt ein kleiner Stichprobenumfang zu einem hohen Methodikfehler<sup>161</sup> und zu „verschobenen“ Ergebnissen. Dies ist z. B. bei der Modellierung für die *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* der Fall. Der Grund hierfür liegt bei der Wahl, die Modellierung als Zufallsexperiment durchzuführen. Es muss eine große Bandbreite an Möglichkeiten vorliegen, die Schritt für Schritt bei der Erstellung und Zuweisung von Flügen limitiert wird. Durch den begrenzten Stichprobenumfang bei den *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* (nur vier Repräsentanten) haben Ausreißer einen großen Einfluss auf die Parameterbildung der Wahrscheinlichkeitsverteilung, die wiederum zur Modellierung der Wochenganglinie herangezogen werden. Erfolgt die Bildung des Frequenzwertes für dieses Zeitfenster „auf Basis des Ausreißers“, liefert nur dieser einen genügend hohen Datenpool zur Beschreibung der kombinatorischen Möglichkeiten. Jedoch bietet dieser allein kein ausreichendes Potenzial für eine zufällige, kombinatorische Zuweisung der Flugplanparameter. Eine Überlagerung von mehreren, ähnlichen Grundgesamtheiten ist vonnöten (siehe auch Kapitel 7.3).

<sup>161</sup> Das heißt, Flüge können nicht korrekt zu den Slots zugeordnet werden und verfallen somit.

## 4.6 Weitere Flughafenelemente

Dieses Kapitel soll kurz auf Elemente eingehen, die in dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet werden, aber dennoch wichtige Aspekte eines Flughafens darstellen.

### Intermodalität

Ursprünglich stammt der Begriff der *Intermodalität* aus dem Bereich des Gütertransports und fand erstmals in den 1960er Jahren in den USA Verwendung. *Intermodaler Verkehr* ist demnach der Transport von Gütern in ein und derselben Ladeinheit (z. B. einem Container) mit zwei oder mehreren Verkehrsträgern. Es erfolgt kein Umschlag der transportierten Güter. [173]

In Bezug auf den Personenverkehr beschreibt *Multimodalität* die grundsätzliche Möglichkeit zur Nutzung verschiedener Verkehrsmittel. Intermodalität erweitert dies durch die Möglichkeit, über Umstiege während einer Reise direkt zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln zu wechseln. Multimodalität beschreibt also das Verhalten von Verkehrsteilnehmern, mehrere Verkehrsmittel über einen definierten Zeitraum und meist über mehrere Wege hinweg zu verwenden (Variation von Verkehrsmitteln). Intermodalität hingegen ist eine Sonderform des multimodalen Verhaltens, bei dem mehrere Verkehrsmittel auf einem Weg in Kombination verwendet werden. Dies stellt eine Verkettung von Verkehrsmitteln dar. [174] S. 23, [175]

Für Flughäfen und deren Passagiere ist die Lage in Bezug auf die Stadt und daraus folgend die regionale sowie überregionale verkehrstechnische Anbindung ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Damit eng verbunden sind sowohl die Zeit, die ein Passagier vom Stadtzentrum zum Flughafen und umgekehrt benötigt, als auch der Preis, den ein Passagier für die Fahrt bezahlt. Beides hängt stark vom gewählten Verkehrsmittel, dessen Verfügbarkeit und der Straßen- sowie ÖPNV-Infrastruktur ab.

Tabelle 4-19 zeigt eine Auswahl an Merkmalen pro Flughafenklasse, die für den Passagier in Bezug auf die Intermodalität eine wichtige Rolle spielen und zusätzlich die Angabe zur Terminalgröße. Die Distanz zum Stadtzentrum definiert sich hierbei über die schnellste, per MIV mögliche Verbindung vom Stadtzentrum zum jeweiligen Flughafen, die von *Google Maps* [176] angegeben wird. Hieraus ergibt sich entsprechend die (verzögerungsfreie) Reisezeit für den MIV bzw. das Taxi. Reisezeiten und Fahrpreise des ÖPNV sind den Webseiten der örtlichen Verkehrsunternehmen entnommen.

Die längste Reisezeit zum Flughafen benötigen Passagiere bei der Anreise zu *Internationalen Hub-Flughäfen*. Sie liegt durchschnittlich bei 27 min per MIV/Taxi bzw. 52 min per ÖPNV. Auch die Kosten für die Fahrt zum Flughafen sind hier am teuersten. Der durchschnittliche Fahrpreis liegt für eine Fahrt mit dem Taxi bei 47,2 US\$ und mit dem ÖPNV bei 9,4 US\$. Im Vergleich dazu sind *Sekundäre Hub-Flughäfen* per Taxi am schnellsten (17 min) sowie kostengünstiger (35,1 US\$) zu erreichen, was sich nur teilweise mit einer geringeren Entfernung zum Stadtzentrum (21 km gegenüber 29 km) begründen lässt. Mit knapp 18 km am dichtesten zum Stadtzentrum gelegen sind *Große Regional-Flughäfen*. Dieser Fakt spiegelt sich auch in den günstigsten Fahrpreisen wider. Mit dem ÖPNV beläuft sich der Preis auf durchschnittlich 4,1 US\$ und mit dem Taxi auf 30,0 US\$. Nichtsdestotrotz beträgt die Korrelation zwischen der Distanz zum Stadtzentrum und dem Taxi-Fahrpreis nur 0,59 respektive dem ÖPNV-Preis 0,48. Demzufolge beeinflussen weitere Faktoren die Preise maßgeblich.

**Tabelle 4-19: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) von intermodalen Merkmalen und der Terminalgröße pro Flughafenklasse, Datenquellen: [176], [72].**

Name	Distanz z. Stadtzentrum [km]	Reisezeit MIV/Taxi [min]	Fahrpreis Taxi [US\$]	Reisezeit ÖPNV [min]	Fahrpreis ÖPNV <sup>162</sup> [US\$]	Terminalgröße [m <sup>2</sup> ]
<i>Internationale FH</i>	21,60 (±11,67)	23 (±12)	33,2 (±23,7)	46 (±23)	6,0 (±6,4)	261 000 (±153 000)
<i>Große Regional-FH</i>	17,64 (±10,48)	20 (±10)	30,0 (±21,8)	43 (±15)	4,1 (±4,3)	87 000 (±73 000)
<i>Kleine Regional-FH</i>	19,61 (±19,17)	23 (±16)	34,6 (±59,3)	49 (±32)	4,7 (±6,9)	61 000 (±65 000)
<i>Fracht-Hub-FH</i>	28,75 (±19,53)	20 (±11)	35,6 (±15,3)	50 (±14)	5,4 (±5,9)	402 000 (±357 000)
<i>Internationale Hub-FH</i>	28,61 (±17,47)	27 (±12)	47,2 (±45,3)	52 (±22)	9,4 (±11,4)	845 000 (±439 000)
<i>Hochfrequenz-Hub-FH</i>	31,03 (±9,72)	21 (±7)	43,9 (±8,8)	52 (±20)	5,4 (±5,3)	547 000 (±58 000)
<i>Sekundäre Hub-FH</i>	21,32 (±11,13)	17 (±7)	35,1 (±17,7)	44 (±21)	4,8 (±4,8)	372 000 (±229 000)

### Terminal

Das Terminal dient als Schnittstelle zwischen Land- und Luftseite eines Flughafens. Je nach Flughafen kann es mehrere, baulich voneinander getrennte Terminals geben. Innerhalb eines Terminals gibt es verschiedene Prozesse, die ein Passagier durchläuft, um am Ende ein LFZ betreten zu können, unter anderem der *Check-in*, die Sicherheitskontrolle, das *Boarding*, etc. Weiterhin bietet ein Flughafen Serviceeinrichtungen an, die ein Passagier während des Aufenthalts im Terminal nutzen kann, unter anderem *Duty-Free-Shops*, Cafés/Restaurants und Einzelhandelsgeschäfte.

Verschiedene Passagiergruppen haben dabei unterschiedliche Bedürfnisse und Eigenschaften, so dass jeder Passagier ein individuelles Verhalten an den Tag legt und sich auf unterschiedliche Weise im Terminal bewegt. Aufgrund dieser Individualität von Passagieren sind mikroskopische Simulationen besser geeignet, um die Prozesse innerhalb eines Terminals zu modellieren (z. B. TOMICS, vgl. Kapitel 2.2.4), so dass diese hier nicht weiter betrachtet werden. Einzig die Terminalgröße ist als beschreibendes Merkmal für Flughäfen aufgenommen worden (siehe Tabelle 4-19).

<sup>162</sup> Hierbei wird die schnellste Verbindung betrachtet. Teilweise sind günstigere Verbindungen verfügbar, die jedoch eine längere Reisezeit aufweisen.

## 5 Verifizierung der Ergebnisse - Generisch vs. Detailbetrachtung

Kapitel 5 befasst sich mit der Verifizierung der Ergebnisse. Diese erfolgt über das Ersetzen von realen Flughäfen innerhalb einer begrenzten Region durch Repräsentanten der Flughafenklassen. Es gilt zu klären, ob hierdurch bestimmte Merkmale der Flughäfen im Durchschnitt über die gesamte betrachtete Region vom Durchschnitt der Realdaten der eigentlichen Flughäfen abweichen. Im Folgenden werden drei unterschiedliche Regionen betrachtet: Deutschland, die Vereinigten Staaten von Amerika und Ostasien.

Es wird zunächst das Ziel verfolgt, die Ergebnisse mit Daten aus Quellen zu verifizieren, welche nicht für die Clusteranalyse genutzt werden. Dies ist aber nur teilweise möglich, da alternative Quellen nur eingeschränkt verfügbar sind (siehe auch Kapitel 3.5).

### 5.1 Vergleich von Realdaten und generischen Werten einer begrenzten Region

#### 5.1.1 Fallbeispiel I - Deutschland

Das erste Fallbeispiel betrachtet die Region Deutschland und dessen 22 internationale Verkehrsflughäfen<sup>163</sup>. Tabelle 5-1 listet zunächst 14 der 22 deutschen Verkehrsflughäfen und deren Realdaten aus dem Jahr 2012 auf, die gleichzeitig auch Elemente für die Definition der Flughafenklassen (Kapitel 4.2) bilden. Zur Verifizierung werden Daten der *Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen* (ADV) [177] herangezogen.

Im Mittel verzeichneten die 14 genannten deutschen Verkehrsflughäfen 13 623 700 Passagiere, 128 700 Flugbewegungen und 247 840 t Fracht für das Jahr 2012 (vgl. Tabelle 5-1). Werden die Realdaten nun durch die Merkmalsausprägungen der Repräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse substituiert, z. B. *Berlin Tegel* (TXL) durch einen *Großen Regional-Flughafen* und *Frankfurt/Main* (FRA) durch einen *Internationalen Hub-Flughafen*, ergeben sich durchschnittlich für die Region Deutschland 12 841 000 generische Passagiere, 126 070 generische Flugbewegungen und 225 280 t generisches Frachtvolumen. Tabelle 5-2 zeigt den statistischen Vergleich zwischen den realen und generischen, durchschnittlichen Werten, wobei zu erkennen ist, dass alle drei Merkmale nur leicht unterschätzt werden. Die Abweichung beim Passagieraufkommen (Fluggäste) beträgt -5,7 % und bei den Flugbewegungen -2,0 %. Weiterhin unterschätzt die Substitution den prozentualen Anteil der Umsteigepassagiere um gerade einmal 2,0 %. Die größte Abweichung ergibt sich mit -9,1 % bei der transportierten Luftfracht und Luftpost.

---

<sup>163</sup> Nach *Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen e. V.* (ADV), [177].

**Tabelle 5-1<sup>164</sup>: Realdaten (2012) der ADV, Teilmenge (n = 14) der Verkehrsflughäfen Deutschlands, [177].**

<b>Flughafen</b>	<b>Fluggäste (An+Ab) [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen, Gewerblicher Linien-, Pauschalflug-, Tramp- + Anford. -verkehr [FB/Jahr]</b>	<b>Luftfracht und Luftpost [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Flughafen- klasse</b>
<b>Berlin Tegel (TXL)</b>	18 153 836	164 653	30 893	Gr. Regional- FH
<b>Berlin Schönefeld (SXF)</b>	7 082 828	60 818	5 913	Kl. Regional- FH
<b>Dresden (DRS)</b>	1 871 113	22 960	142	Kl. Regional- FH
<b>Düsseldorf (DUS)</b>	20 808 472	205 896	38 212	Internationaler FH
<b>Frankfurt/Main (FRA)</b>	57 274 099	471 454	942 427	Internat. Hub- FH
<b>Hahn (HHN)</b>	2 649 585	24 643	175 705	Kl. Regional- FH
<b>Hamburg (HAM)</b>	13 677 609	132 832	28 171	Gr. Regional- FH
<b>Hannover (HAJ)</b>	5 263 952	57 217	15 870	Gr. Regional- FH
<b>Köln/Bonn (CGN)</b>	9 258 861	110 890	730 054	Gr. Regional- FH
<b>München (MUC)</b>	38 217 181	376 889	290 301	Internationaler FH
<b>Münster/Osna- brück (FMO)</b>	1 013 430	12 360	143	Kl. Regional- FH
<b>Nürnberg (NUE)</b>	3 570 748	44 073	7 584	Kl. Regional- FH
<b>Stuttgart (STR)</b>	9 683 309	101 070	31 612	Kl. Regional- FH
<b>Weeze (NRN)</b>	2 206 898	15 376	0	Kl. Regional- FH
<b>Summe</b>	190 731 921	1 801 131	3 469 746	-
<b>Mittelwert (STABW)</b>	13 623 709 (16 121 100)	128 652 (139 420)	247 839 (559 461)	-

<sup>164</sup> Die Spaltenbezeichnungen entsprechen denen der ADV.

**Tabelle 5-2: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012, ADV) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht, Teilmenge (n = 14) der deutschen Verkehrsflughäfen, [177].**

	<b>Fluggäste (An+Ab) [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen, Gewerblicher Linien-, Pauschalflug-, Tramp- + Anford. -verkehr [FB/Jahr]</b>	<b>Luftfracht + Luftpost [Tonnen /Jahr]</b>	<b>Umsteiger [%]</b>
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	13 623 709 (±16 121 100)	128 652 (±139 420)	247 840 (±559 461)	11,0 (±16,0)
<b>MW (STABW), generisch (2 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 7 Kleine Regional-FH, 1 Internationaler Hub- FH)</b>	12 841 000 (±13 587 513)	126 070 (±99 589)	225 280 (±412 887)	9,0 (±7,0)
<b>Differenz [%]</b>	-5,7	-2,0	-9,1	-2,0

Werden jedoch alle 22 Verkehrsflughäfen in Deutschland betrachtet, nimmt die Differenz zwischen den generischen Repräsentanten und den Realdaten zu. Das mittlere Passagieraufkommen liegt nun 12,7 % über den Realdaten, genauso die Flugbewegungen mit 16,4 %. Luftfracht und Luftpost werden mit -14,2 % weiterhin unterschätzt (siehe Tabelle 5-3). Der Grund, für die Überschätzung der Passagier- und Flugbewegungszahlen liegt an der Verteilung der Flughafenklassen, die im zweiten Schritt hinzukommen. Alle acht hinzukommenden Flughäfen<sup>165</sup> werden als *Kleine Regionalflughäfen* eingestuft, so dass ein erhebliches Ungleichgewicht zugunsten dieser entsteht (insgesamt 15 von 22 Flughäfen). Der Repräsentant der *Kleinen Regionalflughäfen* ist im Durchschnitt jedoch deutlich „größer“ als annähernd alle *Kleinen Regionalflughäfen* Deutschlands. Ausnahmen bilden die Flughäfen *Berlin Schönefeld* und *Stuttgart*.

**Tabelle 5-3: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012, ADV) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht, alle 22 deutschen Verkehrsflughäfen, [107].**

	<b>Fluggäste (An+Ab) [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen, Gewerblicher Linien-, Pauschalflug-, Tramp- + Anford. verkehr [FB/Jahr]</b>	<b>Luftfracht + Luftpost [Tonnen/Jahr]</b>
<b>Mittelwert (STABW) ADV</b>	9 109 356 (±14 088 592)	88 097 (±123 102)	196 323 (±477 934)
<b>MW (STABW), generisch (2 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 15 Kleine Regional-FH, 1 Internationaler Hub-FH)</b>	10 439 180	105 320	168 460
<b>Differenz [%]</b>	12,7	+16,4	-14,2

<sup>165</sup> Dies sind die Flughäfen *Bremen* (BRE), *Dortmund* (DTM), *Erfurt* (ERF), *Friedrichshafen* (FDH), *Karlsruhe Baden-Baden* (FKB), *Leipzig/Halle* (LEJ), *Paderborn/Lippstadt* (PAD) und *Saarbrücken* (SCN).

**Tabelle 5-4: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, FBA d. FGK = Flugbewegungsanteil der Fluggesellschaftsklassen, Teilmenge (n = 14) der deutschen Verkehrsflughäfen<sup>166</sup>.**

	FBA d. FGK 0	FBA d. FGK 1	FBA d. FGK 2	FBA d. FGK 3	FBA d. FGK 4	FBA d. FGK 5	FBA d. FGK 6	FBA d. FGK 7
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	0,18 (±0,12)	0,54 (±0,26)	0,02 (±0,02)	0,05 (±0,04)	0,03 (±0,02)	0,18 (±0,19)	0,00 (±0,00)	0,01 (±0,01)
<b>MW (STABW), generisch (2 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 7 Kleine Regional-FH, 1 Internationaler Hub-FH)</b>	0,24 (±0,05)	0,26 (±0,11)	0,01 (±0,00)	0,18 (±0,06)	0,05 (±0,02)	0,05 (±0,02)	0,10 (±0,08)	0,02 (±0,02)
<b>Differenz (absolut)</b>	0,06	-0,26	-0,01	0,13	0,02	-0,13	0,10	0,01

Auf operationeller Ebene gesehen ist der Anteil des Flugbewegungsaufkommens der unterschiedlichen Fluggesellschaftsklassen (siehe Kapitel 4.3 ff.) ein weiteres entscheidendes Merkmal zur Modellierung von Flughäfen. Tabelle 5-4 listet die Werte für das Flugbewegungsaufkommen der realen Flughäfen und der durch die Flughafenrepräsentanten substituierten Flughäfen für die Teilmenge der deutschen Verkehrsflughäfen (siehe Tabelle 5-1) auf. Die Abweichungen sind bei den FGK 2, 4 und 7 marginal und betragen nur  $\pm 1$  %. Jedoch steigen sie bei FGK 6 auf 10 % respektive auf  $\pm 13$  % bei FGK 3 und FGK 5. Einzig bei FGK 1 ist die Differenz mit -26 % deutlich. Diese Unterrepräsentation der *Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften* ist darauf zurückzuführen, dass Fluggesellschaften mit großem Marktanteil in Deutschland wie *AirBerlin* und *Eurowings* in diese Klasse fallen (vgl. Kapitel 4.3.4).

**Tabelle 5-5: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Erlös und Terminal Passagierentgelt, Teilmenge (n = 14) der deutschen Verkehrsflughäfen.**

	Erlös/PAX [US\$]	Erlös [US\$]	Terminal-Passagierentgelt (2013)/PAX [US\$]
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	29,45 (±8,26)	639 240 871 (±597 675 581)	9,35 (±3,20)
<b>MW (STABW), generisch (2 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 7 Kleine Regional-FH, 1 Internationaler Hub-FH)</b>	19,72 (±2,81)	392 464 125 (±429 246 286)	6,85 (±1,98)
<b>Differenz [%]</b>	-33,0	-38,6	-26,7

<sup>166</sup> Zur Erinnerung: Die Spalte FBA d. FGK 0 stellt den Anteil der Flugbewegungen von Fluggesellschaften dar, die in den genutzten Daten nicht benannt sind, so dass keine Zuweisung der Flüge zu den eigentlichen FGK erfolgen kann.

Nicht nur auf operationeller, sondern auch auf der betriebswirtschaftlichen Ebene ist eine Modellierung mit Flughafenrepräsentanten interessant. Tabelle 5-5 zeigt den statistischen Vergleich zwischen den realen und generischen, durchschnittlichen Werten für die Merkmale Erlös, Erlös pro Passagier und Terminal Passagierentgelt. Die tatsächlich erzielten Erlöse der Flughäfen werden um mehr als 30 % unterschätzt. Beispielsweise liegt der Erlös des Flughafens *Stuttgart*, der als *Kleiner Regionalflughafen* eingruppiert wird, mit 30,41 US\$ pro Passagier ca. 60 % über dem durchschnittlichen Erlös pro Passagier dieser Flughafenklasse. Auch die deutschen Vertreter der *Großen Regionalflughäfen*, wie z. B. der Flughafen *Hamburg* (23,85 US\$) und der Flughafen *Hannover* (33,47 US\$), liegen über dem Durchschnitt der Flughafenklasse. Des Weiteren liegt auch die Differenz bei den Erlösen pro Passagier mit 33 % unter dem Durchschnitt.

### 5.1.2 Fallbeispiel II - Nordamerika

Das zweite Fallbeispiel zur Verifikation begrenzt sich auf die Region Nordamerika. Es werden 67 US-amerikanische und 11 kanadische Flughäfen betrachtet, welche ebenfalls die nordamerikanischen Elemente zur Ermittlung der Flughafenklassen (Kapitel 4.2) bilden. Abbildung 5-1 zeigt die geografische Verteilung der Flughäfen auf dem nordamerikanischen Kontinent. Tabelle 5-6 veranschaulicht wiederum den statistischen Vergleich zwischen den realen und den generischen, durchschnittlichen Werten.



Abbildung 5-1: Geografische Verteilung der Flughäfen des Fallbeispiels II, Quelle: [155].

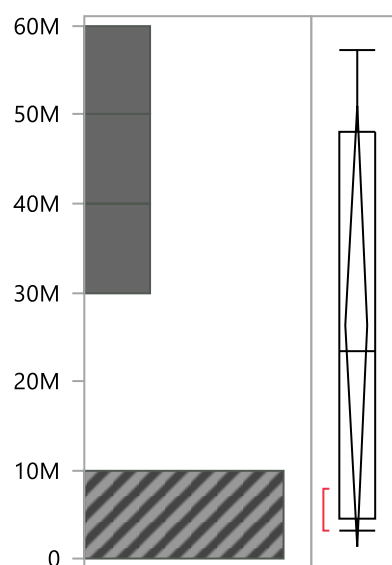


**Tabelle 5-6: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 78 nordamerikanischen Flughäfen.**

	<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Umsteiger [%]</b>
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	17 735 192 (±17 688 211)	228 141 (±187 947)	341 455 (±655 370)	18,0 (±18,0)
<b>MW (STABW), generisch (18 Internationale FH, 36 Große Regional-FH, 3 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 3 Internationale Hub-FH, 4 Hochfrequenz-Hub-FH, 11 Sekundäre Hub-FH)</b>	20 373 859 (±15 711 814)	218 910 (±164 580)	354 667 (±630 812)	18,0 (±15,0)
<b>Differenz [%]</b>	14,9	-4,0	3,9	0,0

Das durchschnittliche Passagieraufkommen pro Jahr wird mit 14,9 % doch deutlich überschätzt. Im Vergleich dazu belaufen sich die Differenzen bei den jährlichen Flugbewegungen auf nur -4,0 % und beim jährlichen Frachtaufkommen auf 3,9 %. Wie bereits bei Fallbeispiel I erwähnt, ist auch hier eine Überrepräsentation einer Klasse zu beobachten. 46 % der Flughäfen werden durch *Große Regionalflughäfen* substituiert. Dadurch ist die Gefahr gegeben, dass sich größere Differenzen ergeben. Der Anteil der Umsteigepassagiere wird ohne Abweichung zu den Realdaten von den generischen Werten modelliert.

Ein weiterer Grund für eine größere Differenz beim durchschnittlichen Passagieraufkommen des nordamerikanischen Fallbeispiels liegt in der besonderen Konstellation einer bestimmten Klasse. Abbildung 5-2 zeigt das Histogramm und den Box-Plot der Passagiere für die Klasse der *Fracht-Hub-Flughäfen*.



**Abbildung 5-2: Histogramm & Box-Plot der Passagiere [PAX/Jahr] für die Flughafenklasse der Fracht-Hub-Flughäfen.**

**Tabelle 5-7: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 78 nordamerikanischen Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf US-amerikanische Vertreter.**

	<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Umsteiger [%]</b>
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	17 735 192 (±17 688 211)	228 141 (±187 947)	341 455 (±655 370)	18,0 (±18,0)
<b>MW (STABW), generisch (18 Internationale FH, 36 Große Regional-FH, 3 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 3 Internationale Hub-FH, 4 Hochfrequenz-Hub-FH, 11 Sekundäre Hub-FH)</b>	19 572 833 (±15 927 075)	216 487 (±164 419)	346 103 (±593 084)	18,0 (±15,0)
<b>Differenz [%]</b>	10,4	-5,2	1,4	0,0

Schraffiert dargestellt sind die nordamerikanischen Vertreter dieser Klasse, nämlich die Flughäfen *Anchorage* (ANC), *Memphis* (MEM) und *Louisville* (SDF). Alle drei Flughäfen haben ein jährliches Passagieraufkommen von unter 10 Mio. Passagieren<sup>167</sup>, die restlichen (asiatischen) Vertreter jedoch mindestens 30 Mio. Passagiere. Aufgrund dieser Konstellation werden bei einer Substitution der o. g. Flughäfen durch den Repräsentanten der *Fracht-Hub-Flughäfen* bei der Betrachtung des Passagieraufkommens pro Jahr durchschnittlich 20 Mio. Passagiere zu viel angenommen. An diesem konkreten Beispiel zeigt sich eine Schwäche der Nichtbetrachtung der geografischen Lage der Flughäfen.

Wenn nur die durchschnittlichen Werte der drei US-amerikanischen *Fracht-Hub-Flughäfen* in Fallbeispiel II einfließen, verringert sich vor allem die Differenz beim Passagieraufkommen pro Jahr auf 10,4 % (vgl. Tabelle 5-7). Die Differenz beim jährlichen Frachtumschlag verbessert sich ebenfalls auf nur noch 1,4 %. Jedoch erhöht sich die Abweichung bei den durchschnittlichen Flugbewegungen pro Jahr auf -5,2. Dennoch sind diese Ergebnisse eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur ersten Analyse dieses Fallbeispiels.

Weiterhin zeigt ein Vergleich der Flugbewegungsanteile der Fluggesellschaftsklassen gute Übereinstimmungen zwischen Realdaten und generischen Werten (siehe Tabelle 5-8). Die Abweichungen liegen bei den FGK 2, 3, 4, 5 und 7 bei weniger als 2 %. Auch der Anteil der FGK 1 wird mit 7 % nur leicht überschätzt. Einzig die FGK 6, also die *Hochfrequenz-Fluggesellschaften*, sind mit -22 % deutlich unterrepräsentiert. Der Grund hierfür liegt darin, dass alle Elemente in FGK 6 US-amerikanische Fluggesellschaften sind (vgl. Kapitel 4.3.4), deren Flugbetrieb auch mehrheitlich in diesen Regionen stattfindet. Beispielsweise hat die FGK 6 am Flughafen *Oakland* (OAK) einen Flugbewegungsanteil von 72 %. Jedoch verzeichnen z. B. *Große Regionalflughäfen* über alle Weltregionen betrachtet durchschnittlich nur einen Anteil von 21 %.

<sup>167</sup> Der Mittelwert liegt bei 5 363 333 (STABW: 2 306 038) Passagieren pro Jahr.

**Tabelle 5-8: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, FBA d. FGK = Flugbewegungsanteil der Fluggesellschaftsklassen von 78 nordamerikanischen Flughäfen.**

	<b>FBA d. FGK 0</b>	<b>FBA d. FGK 1</b>	<b>FBA d. FGK 2</b>	<b>FBA d. FGK 3</b>	<b>FBA d. FGK 4</b>	<b>FBA d. FGK 5</b>	<b>FBA d. FGK 6</b>	<b>FBA d. FGK 7</b>
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	0,14 (±0,14)	0,08 (±0,13)	0,00 (±0,01)	0,24 (±0,13)	0,01 (±0,01)	0,12 (±0,15)	0,41 (±0,27)	0,00 (±0,01)
<b>MW (STABW), generisch (18 Internationale FH, 36 Große Regional-FH, 3 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 3 Intern. Hub-FH, 4 Hochfrequ. Hub-FH, 11 Sekundäre Hub-FH)</b>	0,19 (±0,04)	0,15 (±0,07)	0,01 (±0,00)	0,24 (±0,05)	0,03 (±0,01)	0,16 (±0,07)	0,19 (±0,09)	0,02 (±0,03)
<b>Differenz (absolut)</b>	0,05	0,07	0,01	0,00	0,02	0,04	-0,22	0,02

Tabelle 5-9 veranschaulicht den statistischen Vergleich von betriebswirtschaftlichen Zahlen der realen US-amerikanischen Flughäfen und der Substitution durch die entsprechenden Merkmale der generischen Flughafenrepräsentanten. Wie eben im Fallbeispiel I bereits angemerkt, ist auch in diesem Fall ein wesentlicher Unterschied zu erkennen. Jedoch werden hier die Erlöse und Entgelte deutlich überschätzt. Im Mittel liegen der Erlös pro Passagier um 41 % und der Gesamterlös um 57 % über dem realen Wert. Die Terminal-Passagierentgelte differieren sogar um 87 %. Es zeigt sich, dass nordamerikanische Flughäfen im weltweiten Vergleich ein niedriges Preisniveau aufweisen (im Vergleich zu Fallbeispiel I) und infolgedessen niedrigere Erlöse (pro Passagier) erwirtschaften.

Alternative Datenquellen für eine weitere Verifizierung der Ergebnisse sind kaum vorhanden. Die FAA stellt auf ihrer Homepage weitere Daten für ausgewählte Flughäfen zur Verfügung.

**Tabelle 5-9: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Erlöse und Entgelte von 78 nordamerikanischen Flughäfen.**

	<b>Erlös/PAX [US\$]</b>	<b>Erlös [US\$]</b>	<b>Terminal Passagierentgelt 2013/PAX [US\$]</b>
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	12,68 (±4,26)	231 481 872 (±238 481 872)	3,04 (±1,82)
<b>MW (STABW), generisch (18 Internationale FH, 36 Große Regional-FH, 3 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 3 Internationale Hub-FH, 4 Hochfrequenz-Hub-FH, 11 Sekundäre Hub-FH)</b>	17,83 (±3,56)	363 480 500 (±265 862 465)	5,68 (±1,71)
<b>Differenz [%]</b>	40,6	57,0	86,8

**Tabelle 5-10: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012, [178]) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 56 US-amerikanischen Flughäfen.**

	<b>Zugestiegene Fluggäste [PAX/Jahr], [178]</b>	<b>Fluggäste (An + Ab) [PAX/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	10 460 738 (±9 762 928)	20 921 476 (±19 525 856)	-
<b>Mittelwert (STABW), generisch (11 Internationale FH, 23 Große Regional-FH, 2 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 3 Internationale Hub-FH, 4 Hochfrequenz-Hub-FH, 10 Sekundäre Hub-FH)</b>	-	22 647 473 (±17 380 824)	-
<b>Differenz [%]</b>	-	8,2	-

Diese umfassen sogenannte *Enplanements*, also zugestiegene Passagiere, und *Landed Weight*<sup>168</sup>. Letzteres bezieht aber einerseits nur *All-Cargo Operations*, das heißt Landungen von Vollfrachtern, und andererseits ist das maximale Landegewicht angegeben. Deshalb wird zunächst nur das Passagieraufkommen verglichen, wobei davon ausgegangen wird, dass eine Gleichverteilung von zusteigenden und aussteigenden Passagieren vorliegt. Eine Auflistung der Flughäfen und deren Kennzahlen ist im Anhang H zu finden.

Im Gegensatz zu den oben durchgeführten Analysen des Fallbeispiels II fließen nur 56 US-amerikanische Flughäfen in den Vergleich ein. Es reduziert sich vor allem die Anzahl der *Großen Regionalflughäfen*. Ähnlich zu den Ergebnissen von oben, wird bei einer generischen Betrachtung dieser Stichprobe das jährliche Passagieraufkommen mit 8,2 % überschätzt (vgl. Tabelle 5-10). Bei der oben beschriebenen Anpassung der Klasse der *Fracht-Hub-Flughäfen* ergibt sich nur noch eine Differenz von 2,8 % (tabellarisch hier nicht dargestellt).

### 5.1.3 Fallbeispiel III - Ostasien

Das dritte Fallbeispiel fokussiert sich auf Ostasien. Einbezogen werden alle Flughäfen der Staaten China, Hong Kong, Taiwan, Südkorea und Japan, die auch in die Clusteranalyse eingeflossen sind. Abbildung 5-3 stellt die 18 Flughäfen und deren geografische Verteilung dar. Auch für dieses Fallbeispiel werden die Originaldaten zur Verifizierung genutzt, da keine anderen Quellen verfügbar waren.

<sup>168</sup> „Aircraft landed weight is the certificated maximum gross landed weight of the aircraft as specified by the aircraft manufacturers“ [179].



Abbildung 5-3: Geografische Verteilung der Flughäfen des Fallbeispiels III, Quelle: [155].

Ähnlich zu Fallbeispiel II fallen (die verbliebenen) drei Vertreter der *Fracht-Hub-Flughäfen* in diese Stichprobe. Die Flughäfen *Hong Kong Chek Lap Kok* (HKG), *Shanghai Pudong* (PVG) und *Seoul Incheon* (ICN) bilden jedoch den Gegenpol zu den o. g. US-amerikanischen *Fracht-Hub-Flughäfen* (Grau dargestellt in Abbildung 5-2) und werden somit durch den Repräsentanten maßgeblich unterschätzt. Deswegen fließen nachfolgend nur die durchschnittlichen Werte der drei asiatischen *Fracht-Hub-Flughäfen* in Fallbeispiel III ein.

Trotz der Anpassung des Repräsentanten der *Fracht-Hub-Flughäfen* ergeben sich größere Differenzen beim durchschnittlichen Passagieraufkommen pro Jahr (-13,6 %) und dem durchschnittlichen Frachtumschlag pro Jahr (-12,1 %). Beide Merkmale werden unterschätzt. Ein Unterschätzen des durchschnittlichen Frachtumschlag pro Jahr ist nicht überraschend, da Ostasien eine der größten Produktionsstätten von Waren weltweit ist und dadurch das Aufkommen an „abfliegender“ Fracht vor allem in Richtung Europa und Nordamerika überdurchschnittlich ist [180]. Ebenso ist der Frachtladefaktor, gemessen an den verfügbaren Frachttonnenkilometern (*Available Freight Tonne Kilometers*, AFTK), mit knapp 60 % in der Region Asien/Pazifik größer als der Frachtladefaktor anderer Weltregionen [180]. Die Flugbe-

Tabelle 5-11: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Passagiere/Flugbewegungen/Fracht von 18 ostasiatischen Flughäfen, Reduzierung der Elemente der *Fracht-Hub-Flughäfen* auf asiatische Vertreter.

	Passagiere [PAX/Jahr]	Flugbewegungen [FB/Jahr]	Fracht [Tonnen/Jahr]	Umsteiger [%]
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	31 533 833 (±21 538 833)	219 111 (±136683)	1 208 471 (±1 197 339)	9,0 (±9,0)
<b>MW (STABW), generisch (3 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 4 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 4 Internationaler Hub-FH)</b>	27 244 833 (±20 894 998)	221 222 (±137 146)	1 061 941 (±1 260 229)	15,0 (±9,0)
<b>Differenz [%]</b>	-13,6	0,9	-12,1	4,0

**Tabelle 5-12: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, FBA d. FGK = Flugbewegungsanteil der Fluggesellschaftsklassen von 18 ostasiatischen Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf asiatische Vertreter.**

	FBA d. FGK 0	FBA d. FGK 1	FBA d. FGK 2	FBA d. FGK 3	FBA d. FGK 4	FBA d. FGK 5	FBA d. FGK 6	FBA d. FGK 7
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	0,23 (±0,16)	0,14 (±0,17)	0,00 (±0,00)	0,03 (±0,05)	0,03 (±0,07)	0,42 (±0,19)	0,01 (±0,03)	0,13 (±0,16)
<b>MW (STABW), generisch (3 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 4 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 4 Internat. Hub-FH)</b>	0,19 (±0,06)	0,18 (±0,11)	0,01 (±0,00)	0,21 (±0,07)	0,03 (±0,02)	0,20 (±0,13)	0,13 (±0,07)	0,05 (±0,05)
<b>Differenz (absolut)</b>	-0,04	0,04	0,01	0,18	0,00	-0,22	0,12	-0,08

wegungen pro Jahr werden dagegen gut modelliert, wobei die relative Abweichung bei nur 0,9 % liegt. Die Differenz bei den Umsteigepassagieren beträgt ebenfalls nur 4 %.

Im Vergleich zu den Fallstudien I und II ergibt die Modellierung der Flugbewegungsanteile der Fluggesellschaftsklassen für Ostasien ein gemischtes Ergebnis (vgl. Tabelle 5-12). Die Abweichungen liegen bei den FGK 2, 4, und 7 bei 1 % bis 5 %. Überschätzt werden die Flugbewegungsanteile der FGK 3 mit 18 %, da *Kleine Netzfluggesellschaften* fast gar nicht in dieser Region vertreten sind. FGK 6 wird mit 12 % ebenso überschätzt. Im Gegenteil dazu wird FGK 5 mit 22 % deutlich unterschätzt. Das heißt, *Große Netzfluggesellschaften* haben im ostasiatischen Raum eine stärkere Markposition im Vergleich zu anderen Weltregionen. Vor allem *Kleine* und *Große Regionalflughäfen*, z. B. der Flughafen *Chubu Centrair* (NGO) bei Nagoya und der Flughafen *Kansai* (KIX) bei Osaka besitzen Anteile von 45 % bis 48 %.

**Tabelle 5-13: Statistischer Vergleich zwischen Realdaten (2012) und generischen Werten, Erlöse und Entgelte, 18 ostasiatische Flughäfen, Reduzierung der Elemente der Fracht-Hub-Flughäfen auf asiatische Vertreter.**

	Erlös/PAX [US\$]	Erlös [US\$]	Terminal Passagierentgelt 2013/PAX [US\$]
<b>Mittelwert (STABW), Realdaten</b>	25,16 (±21,51)	812 046 120 (±606 149 979)	8,10 (±3,77)
<b>MW (STABW), generisch (3 Internationale FH, 4 Große Regional-FH, 4 Kleine Regional-FH, 3 Fracht-Hub-FH, 4 Internationale Hub-FH)</b>	20,96 (±3,42)	564 311 389 (±499 006 151)	7,29 (±2,53)
<b>Differenz [%]</b>	-20,0	-43,9	-11,1

Wie bereits bei den vorangegangenen Fallstudien, ergeben sich auch in diesem Fall beim Vergleich der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen größere Unterschiede zwischen den Realdaten und den generischen Repräsentanten (siehe Tabelle 5-13). Der Erlös pro Passagier wird mit 20 % unterschätzt, der Gesamterlös sogar um 44 %. Im Gegensatz dazu werden die Terminal-Passagierentgelte mit einer Differenz von -11 % recht gut approximiert.

## 5.2 Auswertung der Fallbeispiele

Die drei Fallbeispiele zeigen, dass eine Modellierung von realen Flughäfen innerhalb einer begrenzten Region auf Basis der Repräsentanten der jeweiligen Flughafenklassen möglich ist. Jedoch stellt sich die Frage, warum bei dieser Substitution von realen Flughäfen durch die Repräsentanten bei bestimmten Merkmalen einerseits nur marginale Abweichungen auftreten und andererseits größere Differenzen zu erkennen sind?

### Homogenität der Stichprobe

Ein Fakt, auf den es bei der Anwendung von generischen Flughafenrepräsentanten zu achten gilt, ist das ausgewogene Auftreten aller Flughafenklassen innerhalb der Stichprobe. Kommt es zu einer Überrepräsentation einer Klasse besteht die Gefahr, dass bei größeren Abweichungen des Repräsentanten zu einer Mehrzahl zu substituierender, realer Flughäfen die Gesamtabweichungen zu groß werden. Des Weiteren ist auf die Spanne der Flughäfen zu achten, die substituiert werden sollen. Es können nur Flughäfen modelliert werden, die im Hinblick auf den Typ auch zur Bildung der Flughafenklassen verwendet werden. Demnach können „kleine“ Flughäfen, z. B. mit einem Passagieraufkommen von unter 1,5 Mio. Passagieren pro Jahr, nicht nachmodelliert werden, da sie die untere Grenze der Datenbasis unterschreiten. Diese Flughäfen haben aber auch nur einen geringen Einfluss auf das globale LTS.

Jedoch kann aus dem dritten Fallbeispiel geschlossen werden, dass trotz einer gleichmäßigen Verteilung der Elemente über alle Flughafenklassen, im Mittel eine deutliche Abweichung der Region Ostasien bei einer Substitution der realen Flughäfen durch die Klassenrepräsentanten zu erkennen ist. Vor allem das mittlere jährliche Passagier- und Frachtaufkommen wird unterschätzt. Dadurch wird deutlich, dass bei jeder Anwendung auch regional-ökonomische Faktoren eine wichtige Rolle bei einer Substituierung spielen.

### Geografischer Bias

Auch wenn keine geografischen Merkmale zur Bildung der Flughafen- und Fluggesellschaftsklassen herangezogen werden, sind bestimmte Merkmale so stark ausgeprägt, dass sie zu eigenständigen Klassen führen. Dies ist sowohl bei den *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* als auch bei den *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* (FGK 5) der Fall, die beide ausschließlich aus US-amerikanischen Vertretern bestehen. 50 % aller Flugbewegungen an *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* werden von der FGK 5 durchgeführt (vgl. Tabelle 4-10).

Wie die Fallbeispiele I und III zeigen, wirkt sich dieser geografische Bias aber mit einer stetigen Überrepräsentation (10 % - 15 %) der FGK 5 bei der Betrachtung anderer Weltregionen aus. Anders herum werden die Flugbewegungen der *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* bei regionalen, US-amerikanischen Flughäfen (unter anderem *Große Regionalflughäfen*) deutlich unterschätzt, da z. B. *Southwest Airlines* große Anteile der Flugbewegungen durchführt (z. B.

am Flughafen *Reno/Tahoe*, RNO). Daraus folgt eine Unterrepräsentation (-22 %) beim US-amerikanischen Fallbeispiel II.

Bei den *Fracht-Hub-Flughäfen* zeigt sich ebenfalls dieser geografische Bias. Durch die spezifische Ausprägung des Merkmals Fracht, kann es zu Über- bzw. Unterschätzungen kommen, die die Klasse nicht prägen, wobei diese wiederum geografische Besonderheiten aufweisen. Asiatische *Fracht-Hub-Flughäfen* dienen gleichzeitig als Passagier-*Hub*. Im Gegensatz dazu sind US-amerikanische *Fracht-Hub-Flughäfen* vor allem durch den Frachtumsatz der *Integrator* (*United Parcel Service*, *UPS* und *Federal Express Corporation*, *FedEx*) gewachsen und haben nur ein geringes Passagieraufkommen pro Jahr. Im Allgemeinen kann ein geografischer Bias aber durch die Einbeziehung von Kalibrierungsfaktoren ausgeglichen werden.

### Betriebswirtschaftliche Merkmale

In Bezug auf die betriebswirtschaftlichen Merkmale (Gesamt-) Erlös und Erlös pro Passagier werden die Grenzen einer Substitution von realen Flughäfen durch generische Flughafenrepräsentanten aufgezeigt. Bei allen drei Fallbeispielen treten große Differenzen zwischen realen und generisch modellierten Werten auf. Die Regionen Deutschland und Ostasien werden zwischen 20 % und 44 % unterschätzt. Im Gegensatz dazu liegt bei der Region Nordamerika ein Überschätzen von 40 % bis 57 % vor. Auf die Gründe wird im Folgenden näher eingegangen.

Erlöse von Flughäfen werden, wie auch bei jedem anderen Unternehmen, von unterschiedlichen Faktoren getrieben. Einerseits sind Erlöse kostengetrieben. Tabelle 5-14 zeigt die durchschnittlichen Personalkosten und variablen Kosten pro Passagier ausschließlich in Abhängigkeit der Weltregion. In Europa sind beide Kostenarten durchschnittlich doppelt so hoch wie in Nordamerika. Die Gesamtkosten pro Passagier belaufen sich in Nordamerika im Mittel auf 12,30 US\$, in Europa auf 22,73 US\$. Im asiatisch/pazifischen Raum liegen die durchschnittlichen Gesamtkosten pro Passagier nur knapp über den nordamerikanischen Gesamtkosten (12,30 US\$ vs. 11,38 US\$). Deutlich niedriger sind die durchschnittlichen Gesamtkosten mit 8,27 US\$ hingegen in Ozeanien.

Anfallende Kosten müssen durch Verkehrserlöse und kommerzielle Erlöse (vgl. Kapitel 2.3.2) gedeckt werden. Diese Erlöse fallen von Region zu Region aber unterschiedlich hoch aus (vgl. Tabelle 5-14). Der durchschnittliche Erlös pro Passagier beträgt in Nordamerika nur 12,7 US\$, in den anderen Weltregionen zwischen 20 US\$ und 21 US\$.

**Tabelle 5-14: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Personalkosten, variablen Kosten und des Erlöses pro Passagier und Weltregion.**

Region	Personalkosten/PAX [US\$]	Variable Kosten/PAX [US\$]	Erlös/PAX [US\$]
Nordamerika	3,33 (±1,45)	8,05 (±2,51)	12,70 (±4,26)
Asien/Pazifik	2,42 (±1,25)	9,88 (±9,06)	20,0 (±17,36)
Europa	6,73 (±4,59)	16,00 (±6,93)	20,8 (±9,74)
Ozeanien	1,87 (±1,20)	6,40 (±1,98)	20,7 (±6,69)



**Tabelle 5-15: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der Terminal-Passagierentgelte pro PAX und Landeentgelte versch. LFZ-Typen pro Weltregion.**

Region	Terminal-Passagier-entgelt/PAX [US\$]	Landeentgelt		
		Boeing 747 [US\$]	Boeing 737 [US\$]	Airbus A320 [US\$]
<b>Nordamerika</b>	3,04 (±1,82)	2 327 (±1 479)	518 (±302)	504 (±284)
<b>Asien/Pazifik</b>	8,46 (±3,90)	3 549 (±2 592)	668 (±510)	621 (±476)
<b>Europa</b>	9,01 (±4,13)	3 612 (±1 562)	838 (±560)	816 (±547)
<b>Ozeanien</b>	9,97 (±5,69)	5 067 (±1 865)	1 149 (±485)	1 069 (±453)

Diese Unterschiede liegen unter anderem an der Methode zur Festsetzung der Verkehrsentgelte. Bei Flughäfen im US-amerikanischen Raum erfolgt diese fast ausschließlich nach dem *Single-Till* Ansatz (vgl. Kapitel 0), das heißt, die Erlöse aus dem *Non-Aviation* Bereich des Flughafens werden bei der Festsetzung der Entgelte zur Nutzung des *Aviation* Bereichs berücksichtigt. Der *Single-Till* Ansatz führt in der Regel zu einem geringeren Verkehrsentgeltniveau [93]. Tabelle 5-15 listet die durchschnittlichen Terminal-Passagierentgelte pro Passagier und Landeentgelte verschiedener LFZ-Typen in Abhängigkeit von der Weltregion auf und bestätigt diese Annahme. In Nordamerika liegt das Niveau der Terminal-Passagierentgelte ca. 66 % unter dem Niveau anderer Weltregionen. Auch die Landeentgelte sind im Vergleich zu Europa ca. 33 % und im Vergleich zum asiatisch/pazifischen Raum ca. 20 % günstiger. Ozeanische Flughäfen haben im Mittel die höchsten Verkehrsentgelte. Insbesondere das Landeentgelt, beispielsweise für eine Boeing 747, ist 2,2-mal höher als in Nordamerika.

Im Gegensatz dazu wird im europäischen Raum der *Dual-Till* Ansatz bei der Festsetzung der Verkehrsentgelte verfolgt. In Deutschland werden auf Basis § 19b LuftVG die Entgeltordnungen durch die Flughäfen selbst festgelegt und durch die Genehmigungsbehörde (Landesluftfahrtbehörden<sup>169</sup>) genehmigt bzw. reguliert. Das Gesetz schreibt vor, dass die „Entgeltordnung nach geeigneten, objektiven, transparenten und diskriminierungsfreien Kriterien geregelt“ (§ 19b LuftVG, Abs. 1) sein muss. Weiterhin ist dem „Unternehmer eines Verkehrsflughafens [...] freigestellt, ob und inwieweit er Erlöse und Kosten aus den sonstigen kommerziellen Tätigkeiten des Flughafens bei der Festlegung der Entgelte berücksichtigt“ (§ 19b LuftVG, Abs. 3). Nach Wissen des Autors ist dies bei keinem Flughafen der Fall. Kritisiert wird diese Regelung durch den Bundesverband der Deutschen Fluggesellschaften, da dieses Vorgehen „keine wirksame, transparente und unabhängige Entgeltgenehmigung oder gar ökonomische Regulierung“ darstellt [182]. Auch in anderen europäischen Ländern (z. B. in Großbritannien und Frankreich, siehe [183], [184]) fließen kommerzielle Erlöse nicht oder nur auf freiwilliger Basis in die Berechnung der Verkehrsentgelte ein.

Erlöse sind ebenso nachfragegetrieben. Steigt die Nachfrage nach *Slots* an einem Flughafen und dessen Kapazitäten sind bereits ausgelastet, können höhere Start- und Landeentgelte sowie Terminal-Passagierentgelte die Folge sein. Eine geringe Konkurrenz durch weitere Flughäfen (einer vergleichbaren Klasse) im Einzugsgebiet kann ähnliche Folgen haben. Des Weiteren werden immer mehr Flughäfen privatisiert bzw. agieren wie ein kommerzielles Unternehmen, so dass nicht nur eine Kostensenkung das Ziel ist, sondern die Generierung eines möglichst hohen Gewinns. Dabei setzten Flughäfen unter anderem auf den Ausbau des *Non-Aviation*

<sup>169</sup> Diese nehmen aber eine problematische Doppelrolle ein, da die Länder oft sowohl Anteilseigner der Flughäfen sind als auch die zuständige Genehmigungsinstanz darstellen [181].

Bereichs, da hier die erzielten Gewinne beim Flughafen verbleiben (beim *Dual-Till* Ansatz). Die Verkehrsentgelte sind aufgrund der oft monopolistischen Stellung von Flughäfen (vgl. [181], [185]) reguliert (siehe oben). Im Zuge dieser Kommerzialisierung werden Tertiärfunktionen (vgl. Kapitel 2.2.2) innerhalb der Flughafenterminals und im Umfeld des Flughafens ausgebaut (vgl. Kapitel 2.1), was auch „nicht fliegende“ Passagiere anzieht. Dadurch wird zusätzlicher Erlös generiert, der sich in den Kennzahlen des operationellen Betriebs aber nicht widerspiegelt.

Ein weiterer Grund für größere Differenzen bei einer Substitution von realen Flughäfen durch generische Flughafenrepräsentanten sind unterschiedliche Preisniveaus in den verschiedenen Weltregionen (siehe Abbildung 5-4). Deutschland besitzt im Vergleich zu den USA ein höheres Preisniveau. Laut *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD, [186]) lag das Preisniveau 2010 in Deutschland bei 104 (der Durchschnitt über alle OECD Mitgliedsstaaten = 100) und in den Vereinigten Staaten bei 97<sup>170</sup>. Somit ist ein Unterschätzen der Preise für Deutschland und daraus folgend der Erlöse (pro Passagier) zu erwarten. Dieser Zusammenhang gilt nicht uneingeschränkt für Fallbeispiel III, da mehrere Staaten gleichzeitig betrachtet werden. Japan (124) besitzt zwar ein hohes Preisniveau, China (48) und Südkorea (71) aber ein deutlich niedrigeres. Jedoch umfasst das Fallbeispiel (und auch die Datengrundlage) hauptsächlich die ökonomischen Zentren Chinas, also Peking, Shanghai, Xiamen und Hongkong. Es ist anzunehmen, dass diese ein höheres Preisniveau als China im Mittel besitzen.

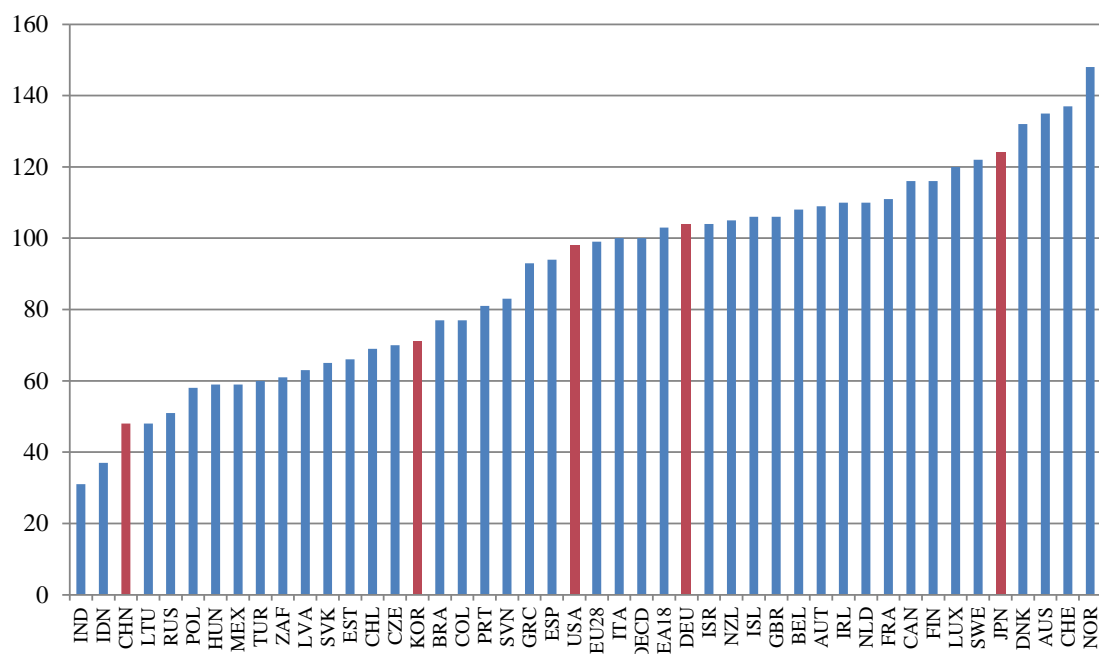


Abbildung 5-4: Preisniveaus, OECD = 100, 2010, Datenquelle: [186].

<sup>170</sup> Eine weitere Quelle hierzu: EUROSTAT, Ausgewählte vergleichende Preisniveaus (Konsum der privaten Haushalte einschl. indirekter Steuern, EU-28 = 100), Jahr 2010: Deutschland: 104, USA: 93, Japan: 128, Schweiz: 148, Datenquelle: [187].

Die Auswertung von betriebswirtschaftlichen Kennzahlen sowohl der Erlösseite als auch in Bezug auf die Entgeltgestaltung zeigt, dass die anfängliche Nichtaufnahme von Merkmalen der Kategorien Finanzen und Effizienz<sup>171</sup> (vgl. Kapitel 4.2.3) als Cluster-bildende Flughafenmerkmale die richtige Entscheidung war. Neben der bereits erwähnten, weltweit uneinheitlichen Zuordnung von Erlösen zu den *Aviation* bzw. *Non-Aviation Revenues* (vgl. Kapitel 2.3.2), treten eben genannte, regionale Spezifika bei den finanziellen Kennzahlen auf. Dadurch wäre es zu einer unweigerlichen Verzerrung gekommen.

### Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen die Fallbeispiele, dass eine allgemeingültige Verwendung von Flughafenrepräsentanten als Substitution realer Flughäfen einer begrenzten Region bei den operationellen Merkmalen gute Ergebnisse liefert. Größere Differenzen von 15 % - 22 % werden in der Auswertung der Fallbeispiele angesprochen und haben im Allgemeinen regional-spezifische Gründe, die bei intensiver Auseinandersetzung mit den Daten anpassbar sind. Infolgedessen ist eine Kalibrierung in Abhängigkeit des Anwendungsfalls zu empfehlen.

Insbesondere bei der Modellierung von betriebswirtschaftlichen Kennzahlen wie Erlösen und Entgelten auf Basis der Flughafenrepräsentanten ist eine Modellierung mit geografischem Bezug notwendig. Zur Kosten- und Erlösstruktur der Flughäfen tragen eine Reihe von wirtschafts-politischen Faktoren bei. Diese sind durch die Flughäfen jedoch nicht beeinflussbar. Weiterhin weisen ebenso die Preisniveaus von Weltregion zu Weltregion eine große Spanne auf, so dass schlussendlich eine generische Modellierung von betriebswirtschaftlichen Kennzahlen auf globalem Level nicht zielführend ist. Das heißt, die geografische Region muss hier zwingend betrachtet werden, was eine Einschränkung der Ziele dieser Arbeit darstellt.

---

<sup>171</sup> Bei Merkmalen mit finanziellem Bestandteil.

## 6 Anwendungsbeispiele für Flughafenklassen

Dieses Kapitel zeigt verschiedene Anwendungen der in Kapitel 4 modellierten Flughafenklassen, Fluggesellschaftsklassen sowie generischen Flugpläne auf. Dabei kann sowohl ein Element verwendet werden, aber auch eine Kombination aus mehreren Elementen. Beispiel I geht darauf ein, wie Flughafenklassen bzw. -repräsentanten für kapazitive Trendaussagen einzelner, realer Flughäfen sowie des Flugnetzes zwischen den Flughäfen (Quellen und Senken) genutzt werden können. Des Weiteren werden bestimmte Merkmale von Flughafenklassen bzw. -repräsentanten für die Modellierung von Routenwahlmodellen herangezogen, was in Beispiel II erläutert wird. Näher eingegangen wird auf die Reisequalität von Passagieren und die Einbeziehung von Merkmalen der Intermodalität oder des Komforts von Flughäfen in Routenwahlmodelle unter Verwendung der Flughafenklassen. Zum Abschluss des Kapitels zeigt Beispiel III auf, inwieweit die Flughafenklassifizierung zur Übertragung wissenschaftlicher Studien genutzt wird, da diese in der Regel nur an einem bestimmten Flughafen durchgeführt werden.

### 6.1 Kapazitive Trendaussagen von Einzelflughäfen

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, können die vorhandenen Flughafeninfrastrukturen in Europa aufgrund flughafennaher Bebauung sowie gesellschaftspolitischer Entwicklungen kaum oder gar nicht erweitert werden. Dies trifft insbesondere für Deutschland zu, aber auch andere europäische Drehkreuze. Beispielsweise befindet sich der Flughafen *London Heathrow* an seiner kapazitiven Leistungsgrenze, doch eine infrastrukturelle Erweiterung des Flughafens ist umstritten<sup>172</sup>. Andererseits steigen die Passagiervolumina von Jahr zu Jahr an (siehe Kapitel 1.1 und Kapitel 3.4).

Führt diese Entwicklung zu einer kapazitiven Sättigung europäischer *Hub*-Flughäfen? Um solche und ähnliche Fragestellungen unter Einbeziehung von Quell- und Zielverkehren des gesamten LTS zu beantworten, können kapazitive Trendaussagen getroffen werden. Die in dieser Arbeit modellierten Flughafenklassen respektive -repräsentanten können dabei den Modellierungsaufwand erheblich reduzieren, was im folgenden Beispiel aufgezeigt wird.

Zentraler Ansatzpunkt für solche Analysen ist das Ersetzen der realen Flughäfen durch die entsprechenden Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse. Abbildung 6-1 zeigt diesen Ansatz beispielsweise mit einer Auswahl an Flughäfen (Flugzielen) in Europa, die vom Flughafen *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) aus angefliegen werden. Wie in Abbildung 6-2 zu sehen, werden diese durch die jeweilige Flughafenklasse (FHK) ersetzt. Es sind z. B. nicht mehr die Flughäfen *Hamburg* (HAM) oder *Warschau* (WAW) sondern Flughäfen der Klasse 2 (*Große Regionalflughäfen*). Wie in den Fallbeispielen aus Kapitel 5.1.1 bis Kapitel 5.1.3 bereits durchgeführt, werden die quantitativen Ausprägungen aller individuellen Merkmale durch die Merkmalsausprägungen des Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse ersetzt. Falls Flughäfen ersetzt werden sollen, die nicht Teil der Stichprobe dieser Arbeit gewesen sind, wird das Vorgehen aus Kapitel 4.2.7 angewendet.

---

<sup>172</sup> Der Flughafen *London Heathrow* soll nach jahrelangen Diskussionen eine 3. SLB bekommen. Jedoch wollen Umweltschutzorganisationen dagegen klagen [188].



Abbildung 6-1: Auswahl<sup>173</sup> an Flughäfen in Europa, die vom Flughafen Paris-Charles de Gaulle (CDG) aus angeflogen werden, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code.



Abbildung 6-2: Modellierung der Flughäfen (außer CDG) durch den Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse (FHK).

Dieses Vorgehen kann schließlich auf alle weltweiten Flugziele eines Flughafens (Senken des Flugnetzwerks) angewendet werden. Abbildung 6-3 zeigt hier beispielsweise eine Auswahl an Flughäfen in Amerika, die vom Flughafen *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) aus angeflogen werden und Abbildung 6-4 stellt wiederum deren Ersetzen durch die jeweiligen Flughafenklassen dar.

Besonders bei *Hub*-Flughäfen können die Langstreckenverkehre im Unterschied zu Kurz- und Mittelstreckenverkehren auch geclustert betrachtet werden (siehe Abbildung 6-4). Das heißt, sie müssen nicht zwingend bestimmten Ziel- bzw. Quellflughäfen zugeordnet werden. Solche Verkehre treten an *Hub*-Flughäfen typischerweise zu bestimmten (Zeit-) *Knoten* bzw. in *Wellen* auf, die weiterhin regionsspezifische Ziel- bzw. Quellflughäfen haben.

<sup>173</sup> Aus Gründen der Übersichtlichkeit (zu viele Labels) wurden nicht alle Flughäfen in Europa aufgezeigt, die vom Flughafen *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) aus angeflogen werden. Dies gilt ebenso für Abbildung 6-2.





Abbildung 6-3: Auswahl<sup>174</sup> an Flughäfen in Amerika, die vom Flughafen Paris Charles-de-Gaulle (CDG) aus angeflogen werden, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code.



Abbildung 6-4: Ersetzen der Flughäfen (außer CDG) durch den Flughafenrepräsentanten der jeweiligen Flughafenklasse (FHK).

Beispielsweise landen am Flughafen *Frankfurt/Main* am frühen Morgen die Verkehre aus Nordamerika und ein Großteil der Verkehre mit dem Ziel Nordamerika starten wieder zwischen 10 Uhr und 11 Uhr vormittags. Ähnlich verhält es sich mit Verkehren in bzw. aus Richtung China und Japan sowie Südostasien und Afrika [47] S. 404. Diese Verkehre können aus kapazitiver Sicht (Passagiervolumina, Flugbewegungen) geclustert werden (vgl. Abbildung 6-4).

Durch das Ersetzen entstehen viele Flughäfen mit gleichen Merkmalsausprägungen. Kritisch betrachtet sind die ersetzten Flughäfen aber nicht gleich. Um ein gewisses „Rauschen“ zu erzeugen, könnten die jeweiligen Flughafenrepräsentanten in gewissen Grenzen verändert werden. Aufgrund der Heterogenität der Flughäfen sollte hierfür nicht die Standardabweichung der einzelnen Flughafenmerkmale herangezogen werden, sondern nur ein bestimmter Anteil davon (z. B. 20 %). Andererseits können durch den langen Zeithorizont solch kapazitiver Trendaussagen (z. B. 20 Jahre) Volatilitäten bei den Flughafenrepräsentanten auf Basis von

<sup>174</sup> Aus Gründen der Übersichtlichkeit (zu viele Labels) wurden nicht alle Flughäfen angegeben, die vom Flughafen *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) aus angeflogen werden. Dies gilt ebenso für Abbildung 6-4.

verschiedenen Wachstumsfaktoren für die Passagier- und Frachtvolumina bzw. das Flugbewegungsaufkommen (vgl. Kapitel 3.4) erreicht werden. Das Einbeziehen der generischen Flugpläne (vgl. Kapitel 4.5) für diese globalen Trendanalysen ist ebenso möglich. Da für jede Flughafenklasse typische Wochen- und Tagesganglinien der Flugbewegungen inklusive des typischerweise eingesetzten Fluggeräts und der operierenden Fluggesellschaftsklasse vorliegen, sind die geclusterten Verkehre mit einfachen Mitteln modellierbar. Einzig die Anteile der Flugbewegungen, die aus einem geclusterten Gebiet zum Zielflughafen, der gerade Untersuchungsgegenstand ist, führen, müssen zusätzlich bestimmt oder abgeschätzt werden.

Durch dieses Vorgehen lässt sich das zukünftige Verhalten eines Flughafens im Ensemble von weltweiten, generischen Flughäfen mit einfachen Mitteln bestimmen und strategische Überlegungen ableiten. Das Ersetzen der individuellen Flughäfen durch die Flughafenrepräsentanten reduziert dabei den Modellierungsaufwand enorm, was einem der zentralen Ziele dieser Arbeit (siehe Kapitel 1.2) entspricht.

## 6.2 Auswirkungen von Flughafenmerkmalen auf die Modellierung von Routenwahlmodellen

In Beispiel II wird aufgezeigt, inwieweit bestimmte Merkmale der Flughafenrepräsentanten für die Modellierung von Routenwahlmodellen herangezogen werden können. Die Flugfrequenz, die Reisezeit und die Transferqualität sind zentrale Faktoren, die die Routenwahl in der Regel beeinflussen. Jedoch können auch die SLB-Kapazität, die Flughafenentgelte (über den Flugpreis) sowie andere Attraktivitätsfaktoren von Flughäfen Einfluss auf die Routenwahl von Passagieren nehmen.

### 6.2.1 Flug- und Routennetzwerk

Fluggesellschaften entscheiden mit dem Aufstellen eines Flugplans von welchem Flughafen A zu welchem Flughafen B geflogen wird. Somit wird ein Flugnetzwerk aufgebaut und gleichzeitig das Flugangebot der Fluggesellschaft bestimmt. Das Ziel ist die Maximierung des Gewinns der Fluggesellschaft. Implizit entscheiden Fluggesellschaften dadurch aber auch, welche Routen die Passagiere durch das globale Netzwerk wählen können.

Es gibt eine Vielzahl von Fluggesellschaften und Flugangeboten am Markt. Die Passagiere entscheiden, welches der Angebote sie bevorzugen und bestimmen somit die Nachfrage auf den einzelnen Routen. Abhängig ist die Entscheidung der Passagiere von zahlreichen Faktoren, die wiederum von ihren persönlichen Präferenzen beeinflusst sind: dem Ticketpreis, der operierenden Fluggesellschaft, dem LFZ-Typ, der Tageszeit, der Flugfrequenz, der (Gesamt-) Reisezeit und der Anzahl an Umstiegen. Die drei letztgenannten werden hier im Folgenden auch unter dem Begriff der Reisequalität (*Quality of Travel*) zusammengefasst (siehe Kapitel 6.2.2).

Abbildung 6-5 zeigt beispielhaft ein vereinfachtes Flug- und Routennetzwerk. Flughäfen bilden die Knoten<sup>175</sup> (rot) in dem Netzwerk, die durch Kanten, also Flugsegmente (schwarz), verbunden werden. Routen (blau) können zwischen jedem beliebigen Knoten des Netzwerks auftreten, auch wenn keine direkte Verbindung (Flugsegment) besteht.

---

<sup>175</sup> Quellen und Ziele (*Origins and Destinations*, OD).

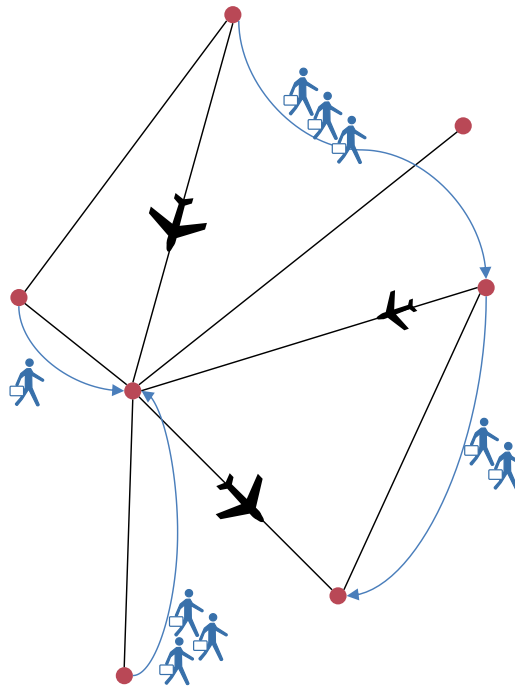


Abbildung 6-5: Beispielhaftes Flug- (schwarz) und Routennetzwerk (blau).

### 6.2.2 Nachfrageprognosen und Reisequalität (Quality of Travel)

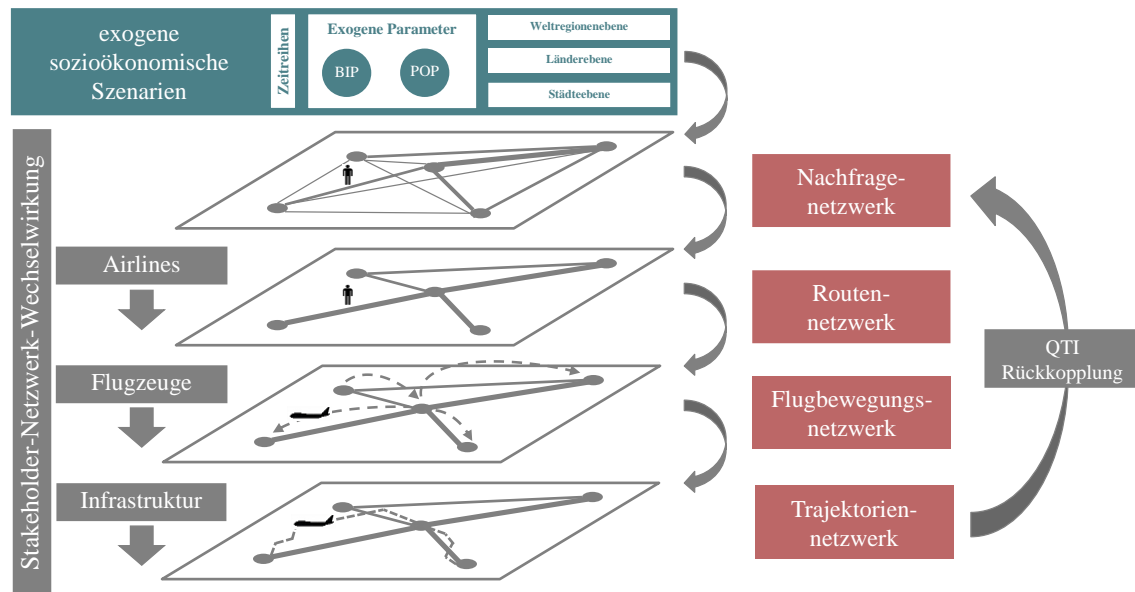
Die Prognose der Flugnachfrage beschäftigt sowohl einzelne Stakeholder des LTS als auch die Wissenschaft. Die Flugzeughersteller *Airbus* und *Boeing* veröffentlichen beispielsweise jährlich sogenannte *Market Forecasts/Outlooks* (siehe z. B. [136], [140]) um auf Basis der Entwicklung der Flugnachfrage die zukünftige Nachfrage nach LFZ abzuschätzen. Fluggesellschaften bewerten auf Basis von Nachfrageprognosen die Eröffnung neuer Flugstrecken zwischen zwei Flughäfen. Im wissenschaftlichen Bereich spielen Nachfrageprognosen hingegen eine wichtige Rolle zur Bewertung von innovativen Technologien oder neuen operationellen Konzepten<sup>176</sup>.

Die Modellierung solcher Nachfrageprognosen basiert vorrangig auf sozioökonomischen Faktoren und deren zukünftige Entwicklung, wie dem BIP oder der Einwohnerzahl. Des Weiteren erfolgt oft eine Prognose von der Nachfrage ausgehend. Das heißt, es gibt keine Interaktion zwischen der Flugnachfrage der Passagiere und dem Flugangebot der Fluggesellschaften. Die realisierte Nachfrage hängt jedoch ebenso von der Reisequalität ab, wie *Kölker et al.* [192] in ihrer Arbeit ausführen. Folglich entwickelten sie den *Quality of Travel Index* (QTI), welcher den mikroökonomischen Einfluss des Flugangebots auf die Flugnachfrage modelliert. Abbildung 6-6 zeigt diesen Zusammenhang an einem Prognosemodell zur Modellierung des globalen LTS von *Ghosh et al.* [193], [194].

Der QTI ist für jede Route des Basisjahrs 2012 basierend auf über 4 000 Städten berechnet worden. Der Index besteht aus drei Summanden: der (durch die Passagiere wahrgenommenen)

<sup>176</sup> Z. B. *Intermediate Stop Operations* (ISO) [189], [190]; Milderung der Klimaauswirkungen des Luftverkehrs (DLR Projekt *WeCare*) [191].





**Abbildung 6-6: AIRCAST (Air Travel Forecast) Modell zur Modellierung des globalen LTS (4-Schichten Philosophie), in Anlehnung an [193], [194].**

Flugfrequenz ( $QTI_f^{177}$ ), der Reisezeit ( $QTI_{tt}$ ) und der Transferqualität<sup>178</sup> ( $QTI_{cnx}$ ). Zusammen ergeben diese eine Methode zur quantitativen Bewertung der Reisequalität aus Passagiersicht. [192]

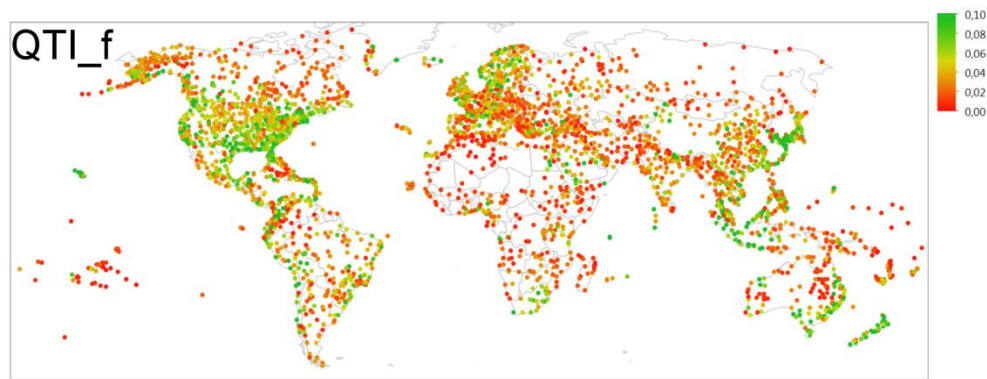
Abbildung 6-7 zeigt den *kumulierten QTI* (2012) als Durchschnitt über alle Passagiere, die ihre Reise an einem spezifischen Flughafen starten und beenden. Der geringste QTI ergibt sich für eine Reihe zentraler US-amerikanischer und norwegischer Flughäfen sowie für andere, vereinzelte Flughäfen. Dabei haben die beiden erstgenannten Regionen im Durchschnitt einen hohen *QTI Flugfrequenz* (vgl. Abbildung 6-8), jedoch fallen der *QTI Transferqualität* (vgl. Abbildung 6-9) und in Folge auch der *QTI Reisezeit* (vgl. Abbildung 6-10) im Vergleich schlechter aus. Passagiere, die ihre Reise an diesen US-amerikanischen oder norwegischen Flughäfen starten oder beenden, müssen deutlich öfter umsteigen. [192]



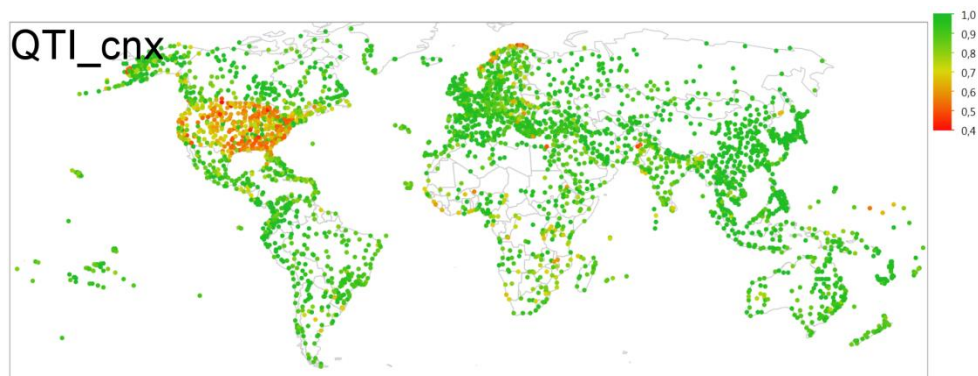
**Abbildung 6-7: QTI kumuliert (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 0,7 (grün) ist die beste und 0,1 (rot) die schlechteste Qualität, [192].**

<sup>177</sup> Der *QTI Flugfrequenz* ist Passagier-gewichtet. Das heißt, ein Passagierpfad mit einer hohen Frequenz und einem niedrigen Passagiervolumen besitzt eine niedrigere Reisequalität als ein Passagierpfad mit einer relativ niedrigen Frequenz aber einem hohen Passagiervolumen.

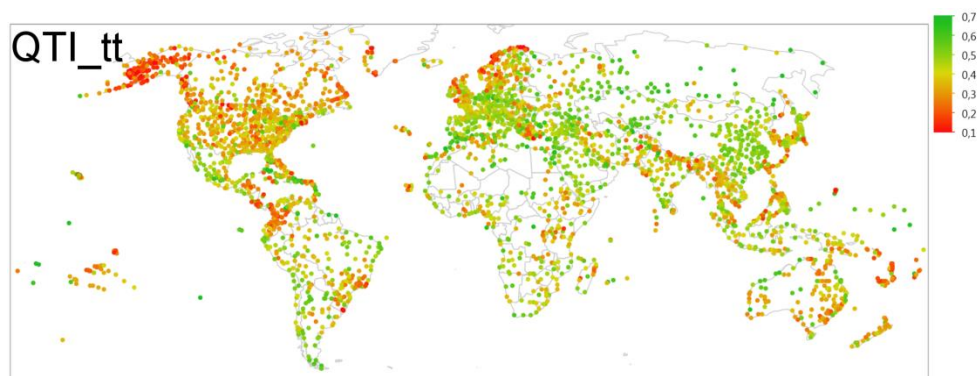
<sup>178</sup> Die Transferqualität ist für einen Passagier, der direkt reist, gleich 1, für einen Passagier, der einmal umsteigt, gleich  $\frac{1}{2}$ , usw.



**Abbildung 6-8: QTI Flugfrequenz (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 0,1 (grün) ist die beste und 0,0 (rot) die schlechteste Qualität, [192].**



**Abbildung 6-9: QTI Transferqualität (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 1,0 (grün) ist die beste und 0,4 (rot) die schlechteste Qualität, [192].**



**Abbildung 6-10: QTI Reisezeit (2012) für alle Passagiere, die an einem spezifischen Flughafen starten/landen, 0,7 (grün) ist die beste und 0,1 (rot) die schlechteste Qualität, [192].**

Die Werte der einzelnen QTI wurden nun mit den Flughafenklassen (siehe Kapitel 4.2.5) aus dieser Arbeit kombiniert. Das heißt, auf Basis der QTI aller zugeordneten Flughäfen einer Klasse (siehe auch Tabelle 8-9) wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen für den *kumulierten QTI*, den *QTI Flugfrequenz*, den *QTI Transferqualität* und den *QTI Reisezeit* berechnet. Tabelle 6-1 zeigt die Ergebnisse für die sieben Flughafenklassen, wobei sich Übereinstimmungen und Parallelen beider Analysen zeigen. Hervorgehoben sind die Klassen mit dem kleinsten (hellgrau) und größten (dunkelgrau) Wert in Bezug auf das jeweilige Merkmal.

Die *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* weisen im Durchschnitt mit 0,136 den deutlich größten *QTI Flugfrequenz* auf (siehe Tabelle 6-1, Zeile 6). Das heißt, diese Flughäfen besitzen neben einer hohen Anzahl an Flugbewegungen auch eine hohe Reisequalität an Passagierpfaden bezüglich der Frequenz (siehe Fußnote 177). Es folgen die *Fracht-Hub-Flughäfen* mit einem *QTI Flugfrequenz* von 0,098 und die *Internationalen Hub-Flughäfen* mit einem *QTI Flugfrequenz* von 0,094. Die *Kleinen Regionalflughäfen* erzielen mit 0,064 den schlechtesten *QTI Flugfrequenz* (vgl. Tabelle 6-1, Zeile 3).

Ähnliche Parallelen zeigen sich bei den *Internationalen Hub-Flughäfen*. Diese weisen mit durchschnittlich 0,558 den höchsten *QTI Reisezeit* und mit 0,911 ebenso den höchsten *QTI Transferqualität* aller Flughafenklassen auf (siehe Tabelle 6-1, Zeile 5). Das heißt, die *Internationalen Hub-Flughäfen* sind nicht nur die Drehkreuze des LTS sondern besitzen auch eine hohe Qualität in Bezug auf die Transferzeit und die Reisezeit der Passagierpfade. Am schlechtesten schneiden bei diesen beiden Kennzahlen die *Fracht-Hub-Flughäfen* ab. Der *QTI Reisezeit* liegt bei durchschnittlich 0,494 und der *QTI Transferqualität* bei durchschnittlich 0,823. Auch beim kumulierten QTI ergibt sich dieses Bild.

Die *Internationalen Hub-Flughäfen* haben über alle Flughafenklassen gesehen die beste und die *Fracht-Hub-Flughäfen* die schlechteste Reisequalität (siehe Tabelle 6-1, Spalte 3).

**Tabelle 6-1: Klassen-spezifische MW und STABW (in Klammern) der verschiedenen QTI-Summanden und des kumulierten QTI pro Flughafenklasse<sup>179</sup>.**

FH-Kl.	Name	kumulierter QTI	QTI Flugfrequenz ( $QTI_f$ )	QTI Reisezeit ( $QTI_{cnx}$ )	QTI Transferqualität ( $QTI_{cnx}$ )
1	Internationale FH	0,495 (±0,046)	0,090 (±0,047)	0,512 (±0,068)	0,885 (±0,081)
2	Große Regional-FH	0,474 (±0,046)	0,082 (±0,046)	0,502 (±0,065)	0,838 (±0,091)
3	Kleine Regional-FH	0,480 (±0,040)	0,064 (±0,039)	0,498 (±0,053)	0,880 (±0,084)
4	Fracht-Hub-FH	0,472 (±0,063)	0,098 (±0,028)	0,494 (±0,075)	0,823 (±0,106)
5	Internationale Hub-FH	0,521 (±0,015)	0,094 (±0,026)	0,558 (±0,029)	0,911 (±0,044)
6	Hochfrequenz-Hub-FH	0,518 (±0,010)	0,136 (±0,026)	0,537 (±0,013)	0,880 (±0,026)
7	Sekundäre Hub-FH	0,487 (±0,017)	0,087 (±0,032)	0,520 (±0,040)	0,852 (±0,048)

<sup>179</sup> Die minimalen und maximalen Zahlenwerte für die Stichprobe der 241 Flughäfen sind wie folgt: *Kumulierter QTI* [min/max]: 0,304/0,569; *QTI Flugfrequenz* [min/max]: 0,003/0,278; *QTI Reisezeit* [min/max]: 0,0272/0,663; *QTI Transferqualität* [min/max]: 0,530/0,999.

### 6.2.3 Erweiterung von Routenwahlmodellen/des QTI um Flughafencharakteristika auf Basis der Flughafenklassen

Sowohl die Routenwahl der Passagiere als auch die Reisequalität bzw. QTI hängen von Faktoren ab, die direkt oder indirekt auch Flughäfen betreffen, die die Passagierroute umfasst. Diese Faktoren werden jedoch kaum oder gar nicht in bisherige Modellierungen von Routen einbezogen. Folgende Flughafenmerkmale sollten bei der Berechnung des QTI zusätzlich berücksichtigt werden.

#### Flughafenentgelte ( $QTI_{cha}$ ):

Verschiedene Flughäfen erheben unterschiedlich hohe Flughafenentgelte (siehe Kapitel 4.4.1). Direkt betrifft dies zunächst die Fluggesellschaften, die für jeden Start bzw. jede Landung sowie für das Abfertigen des LFZ und der Passagiere Entgelte an den Flughafen entrichten. Jedoch wirken sich hohe Entgelte ebenso auf den Ticketpreis aus, den im Endeffekt die Passagiere zahlen, da die Fluggesellschaften diese Kosten an die Passagiere weitergeben. Das heißt, hohe Flughafenentgelte werden den *QTI* Flughafenentgelte für den Start-/Zielflughafen verschlechtern und umgekehrt.

Die Modellierung der Flughafenentgelte für die Einbindung in ein Routenwahlmodell erfolgt durch das Ersetzen der realen Flughäfen durch die Flughafenrepräsentanten (siehe Anwendungsbeispiel I), da, wie oben bereits erwähnt, eine Vollerhebung einen erheblichen Aufwand mit sich bringen würde. Kapitel 4.4.1 geht bereits auf die Verkehrsentgelte der einzelnen Flughafenklassen näher ein.

#### Intermodalität ( $QTI_{imod}$ ):

Ein weiterer Faktor, der zur Bestimmung der Reisequalität der Passagiere hinzugezogen werden kann, ist die Anbindung des Flughafens an bodengebundene Verkehrsträger des ÖPNV sowie die Anbindung an das lokale und überregionale Straßenverkehrsnetz. Daraus folgt für die Passagiere, die Möglichkeit zur Intermodalität (vgl. Kapitel 4.6). Vor allem die Reisezeit vom bzw. zum Stadtzentrum und die Kosten für verschiedene Verkehrsmittel beeinflussen die Entscheidung der Passagiere. Das heißt, umso schneller und kostengünstiger der Flughafen bzw. das Stadtzentrum erreicht werden können, desto höher fällt der *QTI Intermodalität* aus. Weiterhin kann eine Anbindung an den schienengebundenen Personenfernverkehr (z. B. per Intercity-Express der *Deutschen Bahn AG*) den *QTI Intermodalität* verbessern.

Kapitel 4.6 geht bereits auf die Reisezeit vom bzw. zum Stadtzentrum und die Kosten für verschiedene Verkehrsmittel für die einzelnen Flughafenklassen ein, so dass eine Bestimmung des *QTI Intermodalität* hiermit angegangen werden kann.

Nichtsdestotrotz sind die Wahlmöglichkeiten für den Passagier beschränkt, vor allem wenn dieser ein vorgegebenes Flugziel hat<sup>180</sup>. Mögliche Alternativflughäfen müssen gut angebunden sein, um überhaupt als Alternative in Frage zu kommen [12] S. 5, so dass sich für den Passagier ein Kosten- oder Zeitvorteil ergibt. Einzig bei Flughafensystemen, die eine Stadt oder Region bedienen, kann dies der Fall sein.

#### Pünktlichkeit ( $QTI_{punc}$ ):

---

<sup>180</sup> Dies gilt insbesondere für Geschäftsreisende.

Passagieren in Deutschland ist die Pünktlichkeit ihres Fluges nach der Sicherheit das Zweitwichtigste [195], so dass die Hinzunahme dieser Kennzahl zu einer höheren Aussagekraft des QTI führt.

Die Pünktlichkeit (*Punctuality*) von Flügen lässt sich mittels der Differenz zwischen geplanter (STA, *Scheduled Time of Arrival*) und tatsächlicher (ATA, *Actual Time of Arrival*) Ankunftszeit respektive der Differenz zwischen geplanter (STD, *Scheduled Time of Departure*) und tatsächlicher (ATD, *Actual Time of Departure*) Abflugzeit berechnen. Die Summe über alle An- und Abflüge eines Flughafens dividiert durch die Gesamtanzahl der An- und Abflüge ergibt die Kennzahl für die durchschnittliche Verspätung (*Avg. Delay*) des Flughafens bzw. der Flughafenklasse (siehe Formel (6.1)), wodurch der *QTI Pünktlichkeit* bestimmt werden kann.

$$Avg. Delay = \frac{\sum_{ARR} ATA(ARR) - STA(ARR) + \sum_{DEP} ATD(DEP) - STD(DEP)}{\# ARR + \# DEP} \quad (6.1)$$

Dieser Ansatz erfordert wiederum den Zugang zu umfangreichen Flugplaninformationen. Einen ersten Ansatz, ohne größere Mengen an Flugplaninformationen zu erheben, kann hier *Airhelp*<sup>181</sup> liefern, die für 76 Flughäfen weltweit einen Pünktlichkeitsindex berechnen. Laut *Airhelp* hat der Flughafen *Athen Eleftherios-Venizelos* (ATH) den besten Pünktlichkeitsindex (Stand: November 2017). Auch *Flightradar24*<sup>182</sup> zeigt (aktuelle) Verspätungen vieler Flughäfen weltweit an.

Bezüglich der Pünktlichkeit könnte zukünftig auch eine *Risikoklasse* für Flughäfen implementiert werden. Die Risikoklasse nimmt dabei Bezug zu außergewöhnlichen, zeitlich beschränkten Wetterlagen. Beispielsweise treten Hurrikans oder Schneestürme jahreszeitlich in bestimmten Weltregionen vermehrt auf, so dass hier ein erhöhtes Risiko von Verspätungen besteht. Aber auch Flughäfen in unmittelbarer Nähe zu aktiven Vulkanen könnten in eine höhere Risikoklasse eingestuft werden. Aufgrund der zunehmenden Sensibilität für die Auswirkungen des Luftverkehrs auf das Klima und schärferen klimapolitischen Vorgaben können weiterhin Risikoklassen für bestimmte Flugrouten (mit Auswirkungen auf die Flugzeit) eine Rolle spielen.

#### Komfort und Erlebnis ( $QTI_{comf}$ ):

Komfort ist ein facettenreiches Konstrukt, das durch viele Faktoren beeinflusst wird. Dem *Duden* [196] nach bezeichnet Komfort die Bequemlichkeiten bzw. Annehmlichkeiten, die auf technisch ausgereiften Einrichtungen beruhen. *Slater* [197] hingegen bezeichnet Komfort als einen „angenehmen Zustand von physiologischer, psychologischer und physischer Harmonie zwischen Mensch und Umwelt“. Nach *Zhang et al.* ist Komfort auch nicht ausschließlich das Gegenteil von Diskomfort<sup>183</sup>, da beides unterschiedliche Entitäten sind und nicht zwei Gegensätze auf einer kontinuierlichen Skala darstellen [198]. Dies sehen *Wolf und Bubb* [200] ebenso. Der Komforteindruck hängt stark von individuellen Vorstellungen (Stimmung, Tagesform, Vorstellungen, Erwartungen) ab, so dass dieser nicht mess- oder quantifizierbar ist, wohingegen Diskomfort es in begrenztem Maße ist. Komfort und Diskomfort sind somit zur gleichen Zeit unabhängig voneinander erfahrbare [198].

<sup>181</sup> <https://www.airhelp.com/de/airhelp-score/airport-ranking>, zuletzt geprüft am 23. November 2017.

<sup>182</sup> [www.flightradar24.com/delayview](http://www.flightradar24.com/delayview), zuletzt geprüft am 23. November 2017.

<sup>183</sup> Diskomfort fasst Aspekte des „Erleidens“ zusammen, wie beispielsweise Müdigkeit, Schmerz und Beanspruchung, während Komfort sich auf Aspekte des „Gefallens“, wie beispielsweise Entlastung, Annehmlichkeit und Entspannung, bezieht [198], [199].

Menschen bzw. Passagiere am Flughafen haben unterschiedliche Bedürfnisse, Erwartungen und Ängste, nicht zuletzt, weil sie verschiedenen (Passagier-) Gruppen angehören. Hinzu kommt, dass jeder Mensch im Laufe der Zeit eine sogenannte *Komfort-Hierarchie* entwickelt. Das heißt, je mehr Bedürfnisse nach Komfort bis zum jetzigen Zeitpunkt erfüllt worden sind, desto höhere Bedürfnisse werden entwickelt. Bereits realisierte Bedürfnisse werden als selbstverständlich vernommen. [199]

Wenn eine Person gefallen an einer Annehmlichkeit findet, kann daraus ebenso eine Art Erlebnis werden. ACI Europe definiert Passagiererlebnis wie folgt:

*“The passenger experience is a sum of interrelated but not interchangeable factors; the look and feel of the **Premises**, efficient and passenger focused **Processes** and encounters between **People**.”*  
[201] S.28

Die Umwelt für einen Passagier an einem Flughafen setzt sich demnach aus dem Erscheinungsbild des Gebäudes, den Prozessen und den Begegnungen zwischen Menschen, vornehmlich andere Passagiere und das Flughafen- oder Fluggesellschaftspersonal, zusammen.

Die Entwicklung einer Bewertungsskala für die quantitative Modellierung des *QTI Komfort und Erlebnis* ist schwierig. Eine erste Bewertung kann auf Basis des LOS der IATA erfolgen, wobei dieser nur auf die Servicequalität im Hinblick auf den Verkehrsfluss und die Verspätungen innerhalb des Terminals eingeht. Ein wertvoller Ansatz kann die jährliche Bewertung von Flughäfen durch *Skytrax*<sup>184</sup> liefern. Dennoch sind weitere Studien in Bezug auf die Vielzahl von Annehmlichkeiten, die von verschiedenen Gruppen erwartet werden und deren Bewertung untereinander, notwendig.

#### Umsetzung:

Kölker et al. berechnen den QTI wie folgt<sup>185</sup>:

$$QTI(\text{city pair}) = \beta_f * QTI_f + \beta_{tt} * QTI_{tt} + \beta_{cnx} * QTI_{cnx}. \quad (6.2)$$

Die Gewichtungsfaktoren  $\beta_f, \beta_{tt}, \beta_{cnx}$  fließen zunächst gleichverteilt<sup>186</sup> in die Berechnung des  $QTI(\text{city pair})$ <sup>187</sup> ein. Formel (6.2) sollte um die o. g. Flughafenmerkmale  $QTI_f$ ,  $QTI_{tt}$ ,  $QTI_{cnx}$ ,  $QTI_{cha}$ ,  $QTI_{punc}$ ,  $QTI_{imod}$  und  $QTI_{comf}$  erweitert werden, so dass sich der

$$\begin{aligned} QTI_{new}(\text{city pair}) \\ = \beta_f * QTI_f + \beta_{tt} * QTI_{tt} + \beta_{cnx} * QTI_{cnx} + \beta_{cha} * QTI_{cha} + \beta_{punc} \\ * QTI_{punc} + \beta_{imod} * QTI_{imod} + \beta_{comf} * QTI_{comf} \end{aligned} \quad (6.3)$$

ergibt, wobei  $\beta_{cha}, \beta_{punc}, \beta_{imod}, \beta_{comf}$  die neu hinzukommenden Gewichtungsfaktoren repräsentieren. Diese Gewichtungsfaktoren haben sicherlich nicht den gleichen Einfluss im Vergleich zu den bereits in Formel (6.2) genannten Gewichtungsfaktoren. Somit ist eine

<sup>184</sup> <http://skytraxresearch.com/service/airport-ratings>, zuletzt geprüft am 16. November 2018.

<sup>185</sup> Die Berechnungsvorschriften für  $QTI_f$ ,  $QTI_{tt}$  und  $QTI_{cna}$  sind hier nicht detailliert aufgeführt und in [192] zu finden.

<sup>186</sup>  $\beta_f = \beta_{tt} = \beta_{cnx} = \frac{1}{3}$ .

<sup>187</sup> Entspricht dem *kumulierten QTI*.

Gleichverteilung über alle sieben Gewichtungsfaktoren nicht sinnvoll und eine initiale Kalibrierung aller Gewichtungsfaktoren  $\beta$  ist vorzunehmen.

Eine Vollerfassung der Ausprägung der Flughafenmerkmale  $QTI_f$ ,  $QTI_{tt}$ ,  $QTI_{cnx}$ ,  $QTI_{cha}$ ,  $QTI_{punc}$ ,  $QTI_{imod}$  und  $QTI_{comf}$  für alle 4 000 Städte<sup>188</sup> respektive Flughäfen wäre aber aufwändig und nicht zielführend. Zur Reduktion des Modellierungsaufwandes können die in dieser Arbeit vorgestellten Flughafenrepräsentanten verwendet werden. Das methodische Vorgehen ist gleich dem in Anwendungsbeispiel I (vgl. Kapitel 6.1). Das heißt, die realen Flughäfen werden durch die Flughafenrepräsentanten ersetzt. Somit müssen nur für den Stichprobenumfang Daten für die hinzukommenden Flughafenmerkmale erfasst werden, was die Erweiterung der Routenwahlmodelle bzw. des QTI deutlich vereinfacht.

Ebenso können noch nicht geflogene Routen mittels QTI bewertet werden, z. B. die direkte Verbindung zweier Flughäfen einer Klasse, zwischen denen eine ausreichende Nachfrage besteht und die gleichzeitig wenig Flughafenentgelte erheben oder besonders komfortabel sind.

## 6.3 Übertragbarkeit von Forschungsstudien

In Forschungsvorhaben<sup>189</sup> werden oft Konsortien zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen, wie Universitäten oder Großforschungseinrichtungen, und Unternehmen der freien Wirtschaft geschlossen, die das Ziel verfolgen, innovative Technologien weiterzuentwickeln und zu bewerten. Im Bereich der Luftverkehrsforschung sind es einzelne Flughäfen oder Fluggesellschaften, die als (assoziierte) Partner auftreten. Am Beispiel des Projektes *Personalized Airport Systems for Seamless Mobility and Experience (PASSME, [50])* soll im Folgenden aufgezeigt werden, wie einzelne Ergebnisse solcher Forschungsvorhaben, auch auf nicht beteiligte Flughäfen übertragbar sind.

### 6.3.1 Das PASSME Projekt

PASSME war ein dreijähriges (Juni 2015 - Mai 2018) Forschungsprojekt, das durch die *Europäische Union* gefördert wurde und die Ziele verfolgte, unerwünschte Prozesszeiten innerhalb des Flughafens um 60 Minuten zu reduzieren, den Passagieren Echtzeitinformationen über die zukünftige Nachfrage an Flughafenprozessstellen bereitzustellen und passagierorientierten Lösungen zu entwickeln, um den Flughafenaufenthalt angenehmer zu gestalten. Um diese Ziele zu erreichen, mussten die Flughafeninfrastrukturen und -prozesse dahingehend angepasst werden, dass diese prognostizierbar, anpassbar, verlässlich und effizient sind.

Vier Ansätze wurden in PASSME verfolgt, um die o. g. Ziele zu erreichen. Der erste Ansatz war ein System zum Leiten von Passagierflüssen, das auf Echtzeitdaten von Flughafensensoren und den persönlichen Endgeräten der Passagiere zurückgreift. Somit können Prognosen von

<sup>188</sup> Bei Städten mit Flughafensystemen, wie beispielsweise London oder New York, erfolgt eine Zusammenführung der Reisewege der Passagiere zu unterschiedlichen Flughäfen zu einem einzigen Reiseweg pro Städtepaar. Die Reisezeit und die Flugfrequenz ergeben sich hierbei aus dem Passagiergewichteten Durchschnitt.

<sup>189</sup> Z. B. Projekte des *Horizon 2020* Förderprogramm der EU (<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>, zuletzt geprüft am 8. November 2018) oder des *Luftfahrtforschungsprogramms* (LuFo) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Technologie/luftfahrttechnologien-02.html>, zuletzt geprüft am 8. November 2018).

Passagierflüssen erstellt werden und aufkommende Nachfragespitzen von den betroffenen Stakeholdern durch verstärkten Personaleinsatz oder andere Maßnahmen ggf. abgefangen werden. Die Entkopplung der Reisewege von Passagieren und deren Gepäck war ein weiterer Ansatz, der in PASSME untersucht wurde. Dadurch spart der Passagier die Zeit für die Gepäckaufgabe vor dem Flug und die Gepäckabholung nach dem Flug am Gepäckausgabeband, da dieses unabhängig von der Route des Passagiers transportiert wird und in der Regel vor dem Passagier am Zielort eintrifft. Dritter Ansatz von PASSME war die Umgestaltung von Prozessen und Anlagen bei Flughäfen und Fluggesellschaften. Insbesondere wurde ein sogenannte *PASSME Experience Lounge* am Flughafen Hamburg implementiert, die einerseits zum entspannten Verweilen einlädt und andererseits den wartenden Passagieren Hinweise gibt, welche Vorbereitungen während des Wartens getroffen werden können, um den Einstieg in das LFZ zu harmonisieren und im Idealfall zu beschleunigen. Des Weiteren wurden neue Sitze entworfen, so dass Passagiere, die im Gang des LFZ stehen, sich passieren können, da sich die Breite der Sitzgruppe zum Ein-/Ausstiegen verringern lässt. Eine Anwendung (*Application*) für Smartphones oder andere persönliche Endgeräte war der vierte Ansatz von PASSME. Diese versorgt den Passagier mit personalisierten Informationen, vor allem in Bezug auf Wegezeiten sowie Wegfindung und -führung, so dass das Vertrauen der Passagiere steigt und Stress reduziert wird. Des Weiteren können Informationen zwischen Passagier und Flughafen direkt ausgetauscht werden, um dem Passagier zu ermöglichen, informierte Entscheidungen zu treffen.

### 6.3.2 Übertragung der Ergebnisse auf andere Flughäfen

Der Flughafen *Amsterdam Schiphol* (AMS), der Flughafen *Hamburg* (HAM) sowie die Fluggesellschaft *KLM Royal Dutch Airlines* nahmen am PASSME Projekt teil. Die o. g. Ansätze wurden (soweit möglich) umgesetzt und abschließend bewertet, aufgrund der Komplexität und des zur Verfügung stehenden Budgets jedoch nur an einem der beiden Flughäfen.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die erzielten Ergebnisse des Projektes, die durch die Implementierung der Technologien an einem der beiden Flughäfen erzielt wurden, auf andere Flughäfen übertragbar sind?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung, kann auf die Ergebnisse dieser Arbeit zurückgegriffen werden. Beide Flughäfen sind grundsätzlich nicht gleich und gehören verschiedenen Flughafenklassen an. Der Flughafen *Hamburg* (HAM) ist, den Ergebnissen dieser Arbeit folgend, ein *Großer Regionalflughafen* (FHK 2)<sup>190</sup>. Das heißt, der Flughafen *Hamburg* (HAM) ist ähnlich zu anderen Flughäfen dieser Klasse, beispielsweise zu den Flughäfen *Hannover-Langenhagen* (HAJ) und *Köln/Bonn* (CGN) in Deutschland bzw. den europäischen Flughäfen *Lyon Saint-Exupéry* (LYS), *Manchester* (MAN) und *Warschau* (WAW). In Folge dessen sind das Passagier- und Flugverkehrsaufkommen, der Verkehrsmix, die Anzahl der Umsteiger, etc. über ein Jahr gesehen quantitativ ähnlich ausgeprägt und die Flughafeninfrastrukturen, wenn auch baulich anders umgesetzt, sind in ähnlichen Größenordnungen vorhanden.

Alle Flughäfen müssen sich ebenso an dieselben Vorschriften der IATA (z. B. das *Airport Design Reference Manual* [202]), der ICAO (z. B. *Convention on International Civil Aviation* -

---

<sup>190</sup> Vgl. Kapitel 4.2.5.

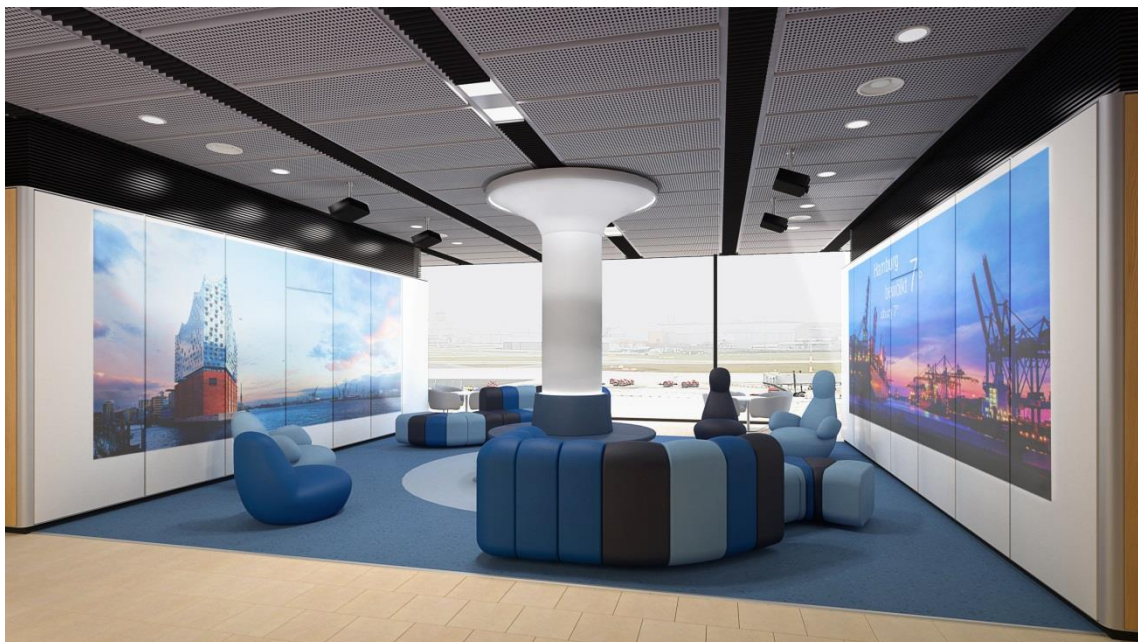


*Annex 14* [203]) oder der *European Aviation Safety Agency*<sup>191</sup> (EASA, (EC) No 216/2008 [204], (EU) No 139/2014 [205]) in Bezug auf die Gestaltung von (Terminal-) Prozessen sowie die bauliche Ausgestaltung von Infrastrukturen halten. Für ein gegebenes Passagieraufkommen ergeben sich somit ähnliche Anforderungen sowohl an die landseitige als auch luftseitige Infrastruktur.

Dadurch wird eine Vergleichbarkeit zwischen den Flughäfen einer Flughafenklasse erreicht und alle Ergebnisse, die am Flughafen *Hamburg* erzielt wurden, sind zumindest auf alle Flughäfen der Klasse der *Großen Regionalflughäfen* übertragbar.

Gleiches gilt für den Flughafen *Amsterdam Schiphol* und die Flughäfen der Klasse der *Internationalen Hub-Flughäfen* (FHK 5)<sup>192</sup>. Das heißt, die Ergebnisse sind beispielsweise auf die europäischen Flughäfen *Frankfurt/Main* (FRA) und *Paris-Charles de Gaulle* (CDG) bzw. die amerikanischen Flughäfen *New York John F. Kennedy* (JFK) und *Miami* (MIA) übertragbar, da diese Flughäfen ebenfalls der Klasse der *Internationalen Hub-Flughäfen* angehören.

Nichtsdestotrotz müssen kulturelle Besonderheiten, landespezifische Regularien und die Art der Technologie, die bewertet und auf einen anderen Flughafen übertragen werden soll, in Betracht gezogen werden. Ein Teil des dritten Ansatzes ist die *PASSME Experience Lounge* (siehe Abbildung 6-11). Diese zielt auf die Verbesserung des Flughafenerlebnisses ab und die Sensibilisierung der Passagiere für das Einsteigen ins LFZ, so dass Stress bei den Passagieren vermieden wird. Solche designtechnischen Lösungen sind ohne Einschränkungen auf andere Flughäfen übertragbar, da sie nicht von den Merkmalen des Flughafens abhängen, an dem sie implementiert wurden. Andere Lösungsansätze, wie z. B. das System zum Leiten von Passagierflüssen, sind natürlich an technische Randbedingungen geknüpft, jedoch theoretisch übertragbar.



**Abbildung 6-11: Visualisierung der PASSME Experience Lounge am Flughafen Hamburg, Almadesign [206].**

<sup>191</sup> Die Regularien der EASA gelten nur für Flughäfen innerhalb der EU. Für US-amerikanische Flughäfen gelten beispielsweise die jeweiligen Regularien der FAA.

<sup>192</sup> Vgl. Kapitel 4.2.5.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Im Fokus dieser Arbeit steht die Modellierung von generischen Flughäfen. Hierfür werden auf Basis verschiedener Datenquellen wichtige Merkmale von 241 realen Flughäfen aus den Kategorien Infrastruktur, Betrieb, Finanzen und Effizienz erhoben und betrachtet. Die Modellierung erfolgt mittels einer hierarchisch, agglomerativen Clusteranalyse, wobei die *Anzahl der SLB*, das *Aufkommen an Passagieren* und *Flugbewegungen pro Jahr*, das *Frachtvolumen pro Jahr* und der *Anteil an Umsteigern* als maßgebliche Merkmale zur Bestimmung der Flughafenklassen dienen. Bezüglich der Kategorie Finanzen und Effizienz ist die Datenbasis eingeschränkt oder nicht konsistent, so dass keines der Merkmale gewählt wird. Die Clusteranalyse mündet in 7 Flughafenklassen: *Kleine und Große Regionalflughäfen*, *Internationale Flughäfen*, *Sekundäre Hub-Flughäfen*, *Internationale Hub-Flughäfen*, *Hochfrequenz-Hub-Flughäfen* und *Fracht-Hub-Flughäfen*. Im Gegensatz zu bisherigen Flughafenklassifizierungen, die oft nur an der Größenordnung von einem Merkmal festgemacht sind, ermittelt diese Arbeit Flughafenklassen auf einer breiten Datenbasis. Es besteht die Möglichkeit Flughafenrepräsentanten für jede der Klassen abzuleiten und mit quantitativen Werten für jedes einzelne Merkmal zu hinterlegen.

Im Zuge der Modellierung von generischen Flughäfen werden ebenso flughafennahe Elemente des LTS betrachtet, die einen Einfluss auf die operationellen Abläufe und die ökonomische Entwicklung von Flughäfen haben. Dadurch erfolgt in dieser Arbeit ebenso die Betrachtung von Fluggesellschaften, den wichtigsten Kunden von Flughäfen. Methodisch wiederum einer hierarchisch, agglomerativen Clusteranalyse folgend, werden sieben Fluggesellschaftsklassen auf Basis von 194 realen Fluggesellschaften identifiziert: *Regional-Fluggesellschaften*, *Kleine und Große Netzfluggesellschaften*, *Kurz- und Langstrecken-Punkt-zu-Punkt-Fluggesellschaften*, *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* und *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften*. Die Merkmale, die in diese Clusteranalyse einfließen, sind das *Frachtaufkommen pro Jahr*, die *LFZ-Flugstunden pro Jahr*, die *Netzwerk-Direktheit*, die *durchschnittliche Flugdistanz* und der *Passagierladefaktor*. Klassifizierungen von Fluggesellschaften wurden bisher ebenso nicht auf konkrete quantitative Ausprägung verschiedener Merkmale von Fluggesellschaften bezogen und nicht auf einer solch breiten Datenbasis durchgeführt. Sie nutzen nur qualitative Merkmale zur Klassifizierung (vgl. [49]). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass spezialisierte Fluggesellschaftstypen, wie *Hochfrequenz-Fluggesellschaften* und *Hybrid-Fracht-Fluggesellschaften*, die gängigen Typen ergänzen und die quantitative Ausprägungen der einzelnen Merkmale der Fluggesellschaftsklassen aufgezeigt werden.

Ebenfalls thematisiert wird eine Methodik zur Modellierung von generischen Flugplänen, dem verbindenden Element zwischen den beiden oben genannten Stakeholdern. Mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden aus mehreren realen Flugplänen der Flughäfen einer Klasse ein Flugplan sowie eine Wochenganglinie für die Klassenrepräsentanten erzeugt. Typische Flugplanelemente, wie z. B. der eingesetzte LFZ-Typ oder die operierende Fluggesellschaft, werden durch generische Klassen ersetzt.

Die Ergebnisse der Arbeit liefern einen Beitrag zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Flughäfen auf einer breiten Datenbasis und festgelegter Merkmale, wodurch ein effizienter Ansatz zur Modellierung und eine Reduzierung der Komplexität erreicht wird.

Die in der Arbeit aufgeführten Beispiele zeigen drei verschiedene Anwendungsfälle von generischen Flughäfen. Beispiel I geht darauf ein, wie Flughafenklassen bzw. -repräsentanten für kapazitive Trendaussagen einzelner, realer Flughäfen genutzt werden können.

Des Weiteren können bestimmte Merkmale von Flughafenklassen bzw. -repräsentanten für die Modellierung von Routenwahlmodellen herangezogen werden, wie in Beispiel II aufgezeigt wird. Die Entscheidung über die Routenwahl liegt bei den Passagieren, die nach bestimmten Qualitätskriterien getroffen wird. Die Flugfrequenz, die Reisezeit und die Transferqualität sind dabei die wichtigsten Kriterien. Auf Basis der Flughafenrepräsentanten können Flughafenmerkmale, wie die Pünktlichkeit oder der Komfort, in die Bewertung der Reisequalität einfließen.

Beispiel III geht näher darauf ein, inwieweit die Flughafenklassifizierung zur Übertragung wissenschaftlicher Studien genutzt werden kann. Solche Studien werden oft an nur einem bestimmten Flughafen durchgeführt. Jedoch können die Flughafenklassen genutzt werden, um ähnliche Flughäfen zu identifizieren, auf die die Ergebnisse der wissenschaftlichen Studien aufgrund der Ähnlichkeit der Flughäfen ebenso zutreffen.

## 7.2 Kritische Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen eine Zeitpunkt Betrachtung dar. Das heißt, sie spiegeln eine bestimmte, zeitlich begrenzte Situation wider. Bestimmte Merkmale von Flughäfen und Fluggesellschaften verändern sich aber von Jahr zu Jahr. Beispielsweise erfahren die Passagierzahlen aufgrund des allgemeinen Wachstums der Luftverkehrswirtschaft in der Regel einen Zuwachs. Weiterhin können Unternehmen auch aus dem Markt verschwinden, wobei dies eher Fluggesellschaften als Flughäfen betrifft, wie die Beispiele *Alitalia* [207], *Monarch* [208], [209] und *AirBerlin* des Jahres 2017 zeigen. Infolgedessen wachsen andere Fluggesellschaften überproportional, da diese oft Teile der insolventen Fluggesellschaften übernehmen [210], [211]. Im Gegensatz dazu ist ein völliges Verschwinden größerer Flughäfen vom Markt eher ausgeschlossen, da bei einer Schließung oft Neubauten im Umfeld die Verkehrslast übernehmen<sup>193</sup>. Einzig kleinere Regionalflughäfen stellen gelegentlich den Betrieb ein. Andererseits verändern sich bestimmte Merkmale von Flughäfen auch nur langsam, z. B. infrastrukturelle Merkmale von Flughäfen.

Es stellt sich die Frage, wie stabil sich die quantitativen Ausprägungen der Merkmale über die Jahre verhalten. Wie in Kapitel 4.2.6 und 4.2.7 bereits untersucht, ziehen einzelne, kleinere Veränderungen keine größeren Veränderungen nach sich und die Merkmalsausprägung einer Klasse verändert sich nur in begrenztem Umfang. Es besteht aber die Möglichkeit, dass sich durch die Eröffnung weiterer Flughäfen und die unterschiedliche weltweite Entwicklung des

---

<sup>193</sup> Ein Beispiel ist die Schließung des Flughafens *Berlin Tempelhof* (THF) am 31. Oktober 2008. Im letzten kompletten Betriebsjahr 2007 wurden aber nur 350 000 Passagiere und 24 000 Flugbewegungen abgefertigt (deutlich weniger Verkehrsaufkommen im Vergleich zu allen anderen Elementen der Clusteranalyse dieser Arbeit) [212], die von den Flughäfen *Berlin Tegel* (TXL) und *Berlin Schönefeld* (SXF) aufgenommen wurden.

Flugverkehrs die Klassen respektive Zuordnung der Flughäfen zu den Klassen zukünftig (in 10 Jahren) stärker verändern können.

Die größte Herausforderung ist, dass hierfür die Datengrundlage nicht zur Verfügung steht und eine Neubeschaffung der Daten durchgeführt werden müsste, die unter Umständen kostspielig ausfallen kann. Eine Lösung stellt das Fortschreiben der Daten auf Basis von Wachstumszahlen (Passagierwachstum, Flugbewegungswachstum<sup>194</sup>, Frachtwachstum, etc.) sowohl bei Flughäfen als auch Fluggesellschaften dar. Dieses Vorgehen müsste zumindest mit regionalem Bezug erfolgen, um unterschiedliche Wachstumsraten einzubeziehen. Ein detaillierteres Vorgehen wäre in Bezug auf den Aufwand gleichzusetzen mit der Neubeschaffung von Daten. Einzig Merkmale der Infrastruktur bei Flughäfen ändern sich nur selten, so dass eine Aktualisierung leicht möglich ist. Trotz der genannten Aufwände ist eine komplette Aktualisierung der Daten in einem bestimmten zeitlichen Abstand von 7 - 10 Jahren zu empfehlen, so dass die Merkmalsausprägungen auf einen aktuellen Stand gebracht werden und ebenso eine Betrachtung über die Zeit möglich ist (vgl. Kapitel 7.3).

Weiterhin zeigen die Fallbeispiele, dass eine Verwendung von Flughafenrepräsentanten als Substitution realer Flughäfen einer begrenzten Region nicht allgemeingültig über alle Merkmale gute Ergebnisse liefert. Spezifische Verhältnisse der betrachteten Region müssen berücksichtigt werden und eine Kalibrierung in Abhängigkeit des Anwendungsfalls vorgenommen werden. Dies ist insbesondere bei der Modellierung von betriebswirtschaftlichen Kennzahlen wie Erlösen und Entgelten auf Basis der Flughafenrepräsentanten notwendig, da zur Kosten- und Erlösstruktur der Flughäfen eine Reihe von wirtschaftspolitischen Faktoren beitragen. Das heißt, die geografische Region muss hier zwingend betrachtet werden, was aber eine gewisse Einschränkung der Ziele in Bezug auf eine globale Modellierung (vgl. Kapitel 2.1 und Kapitel 4.2.3) darstellt.

### 7.3 Weiterführende Studien

Die Modellierungsansätze und die Anwendungsbeispiele dieser Arbeit bilden den Ausgangspunkt für mögliche weitere Studien zu generischen Flughäfen. Im Vordergrund steht dabei vor allem eine Verfeinerung der Ergebnisse.

Eines der grundlegenden Ziele dieser Arbeit ist die Reduktion der Komplexität und Datenfülle durch die Modellierung von generischen Flughäfen und flughafennahen Elementen. Dennoch ist eine Betrachtung der Entwicklung der einzelnen Klassen über die Jahre eine sinnvolle Weiterentwicklung dieser Arbeit. Ein Ziel dabei wäre, ob die Klassenbildung in sich stabil bleibt oder sich über die Zeit gänzlich neue Klassen herausbilden. Dadurch kann neben der durchgeführten Zeitpunktbetrachtung auch eine Zeitrumbetrachtung durchgeführt werden. Insbesondere wäre eine Analyse der Entwicklung betriebswirtschaftlicher Kennzahlen über einen bestimmten Zeitraum hilfreich, um hieraus die zugrunde liegenden Zusammenhänge zu modellieren und gegebenenfalls Merkmale der Kategorie Finanzen zu einer Clusterbildung hinzuzuziehen. Nichtsdestotrotz muss hierfür zunächst die Datengrundlage geschaffen werden (vgl. Kapitel 7.2 oder [101]). In diesem Zusammenhang ist auch die Einbeziehung von gesellschaftspolitischen Faktoren denkbar. Beispielsweise ist es in China oder Ländern des Nahen Ostens einfacher eine neue SLB bzw. Flughäfen zu bauen als in Europa oder

---

<sup>194</sup> Vgl. Kapitel 3.4.2.

Nordamerika [38]. Dadurch können sich Flughäfen in diesen Regionen dynamischer entwickeln, neben der Tatsache, dass das Luftverkehrswachstum im asiatischen Raum derzeit am größten ist [136].

Eine weitere Verfeinerung der Ergebnisse würde das Einbeziehen von Effizienzfaktoren als Cluster-bildende Merkmale mit sich bringen. Effizienz ist das Verhältnis zwischen dem erzielten Ergebnis und den eingesetzten Mitteln<sup>195</sup>. Eine Maßnahme ist demnach effizient, wenn sie mit minimalem Einsatz von Ressourcen erreicht wird. Monetäre Ressourcen stehen hierbei in der Regel im Vordergrund. Wie bereits in der Arbeit ausgeführt (vgl. Kapitel 2.3.2 und Kapitel 5.2), ist die Vergleichbarkeit zwischen betriebswirtschaftlichen Kennzahlen aufgrund fehlender weltweiter Standards der Berichterstattung schwierig. Obwohl viele Flughäfen und Fluggesellschaften verpflichtet sind, betriebswirtschaftliche Kennzahlen in ihren Geschäftsbereichen zu veröffentlichen, sind diese Informationen in der Regel schwierig miteinander vergleichbar. Ein Grund sind beispielsweise Konzerne, zu denen mehrere Flughäfen (z. B. *Fraport AG*) oder Fluggesellschaften (z. B. *Lufthansa AG* oder *International Consolidated Airlines Group, S.A.*, IAG). Die Geschäftsberichte umfassen oft konzernweite Ergebnisse und gehen nicht immer auf Kennzahlen der einzelnen Flughäfen bzw. Fluggesellschaften ein oder beinhalten Beteiligungen an weiteren Unternehmen, die in die Gesamterlösberechnung einfließen. Dadurch wird die Bestimmung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses eines einzelnen Flughafens bzw. einer einzelnen Fluggesellschaft erschwert. Eine Lösung hierfür zu finden, ist herausfordernd. Ansätze für die hierarchische Modellierung der Kosten von Fluggesellschaften in Abhängigkeit von Fluggesellschaftstyp und der Weltregion werden in [214] und [143] aufgezeigt.

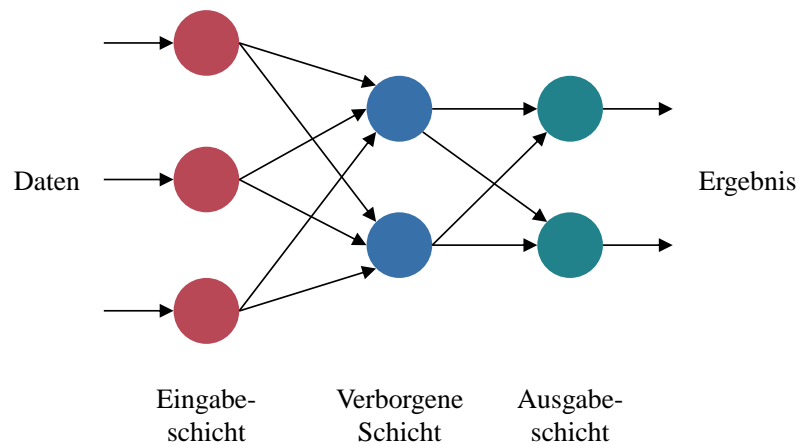
Ebenso könnten beim BoGS Modell gezielte Erweiterungen die Ergebnisse verbessern. Wie in Kapitel 4.5.4 erwähnt, basiert einerseits die Erstellung der Wochenganglinie auf einer Zufallszahl der modellierten Wahrscheinlichkeitsverteilung und andererseits die Erstellung und Zuweisung der einzelnen Flüge auf einem Zufallsexperiment. Diese Methodik wird gegenwärtig nur einmal pro Durchlauf eines Szenarios ausgeführt. Durch die Anwendung einer sogenannten *Monte-Carlo-Simulation* könnte eine große Anzahl gleichartiger Zufallsexperimente durchgeführt werden. Der Vorteil gegenüber der Einzelpunktschätzung ist, dass eine Verteilung möglicher Ergebnisse generiert wird, welche eine Eingrenzung des Lösungsraums hervorbringen und die Wochenganglinien für die Flughafenklassen sowie die Erstellung und Zuweisung von Flügen zu den einzelnen Flugbewegungen verbessert.

Methodisch könnte auch der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen<sup>196</sup> (*Artificial Neural Network*) als Ersatz für die Clusteranalyse eine Möglichkeit zur Verfeinerung der Ergebnisse bieten. Diese bestehen aus miteinander verbundenen, künstlichen *Neuronen*, wobei zwischen Eingabe-, Ausgabe- und verborgenen Neuronen bzw. Einheiten (*Units*) unterschieden wird. „Übereinander“ angeordnete Einheiten werden in Schichten (*Layer*) zusammengefasst (vgl. Abbildung 7-1). Der *Input*, den eine Einheit empfängt, berechnet sich aus dem Output der sendenden Einheit und dem *Gewicht* der Verbindung zwischen den beiden Neuronen. Sämtliche Inputs einer Unit werden addiert und ergeben den *Netzinput*.

---

<sup>195</sup> Nach ISO 9000:2005 [213].

<sup>196</sup> Eine gute Übersicht zur Architektur von verschiedenen neuronalen Netzwerken liefert [215].



**Abbildung 7-1: Schematische Darstellung eines künstlichen neuronalen Netzes, in Anlehnung an [216].**

Bei künstlichen neuronalen Netzen wird weiterhin zwischen einer Trainings- und einer Testphase unterschieden. In der Regel durch Modifikationen der Gewichte lernt das Netz anhand des vorgegebenen Trainingsmaterials. Bei vorgegebenem, korrektem Output wird von überwachtem Lernen (*Supervised Learning*) gesprochen und daran die Gewichte zwischen den Neuronen optimiert. Ist kein Output vorgegeben, wird dies als unüberwachtes Lernen (*Unsupervised Learning*) bezeichnet. In der sich anschließenden Testphase werden die Gewichte nicht mehr verändert und es wird überprüft, ob das Netz einen Lerneffekt erzielt hat. Mittels der erneuten Stimulierung durch die *Ausgangsreize* wird kontrolliert, ob das neuronale Netz die Trainingsinhalte erfasst hat. Wenn *neue Reize* dem Netz zugeführt werden, lässt sich feststellen, ob das Netz in der Lage ist, neue Aufgaben zu lösen. [217]

Die Vorteile von künstlichen neuronalen Netzen liegen darin, dass für große Datenmengen und viele Datendimensionen sinnvolle Ergebnisse ermittelt werden können. Weiterhin können im Vergleich zu existierenden statistischen Ansätzen bessere Ergebnisse erzeugt werden, wenn das Problem ausreichend komplex ist. Andererseits sind künstliche Neuronale Netzwerke oftmals wie eine Blackbox.

Eine Validation der Ergebnisse ist oft schwierig, da Entscheidungen des Netzes nicht nachvollzogen werden können. Des Weiteren wirken sich nachteilig aus, dass es vieler Beispiel- und Trainingsdaten bedarf, um ein allgemeingültiges Ergebnis zu berechnen und zu keinem Zeitpunkt bekannt ist, ob die gefundene Lösung das globale Optimum ist oder ob es noch bessere Lösungen gibt. [216]

## 8 Anhang

### 8.1 Anhang A

#### 8.1.1 Gate-/Vorfeld-Kapazität

Berechnung der Gate-Kapazität  $C_g$  [LFZ/h] nach *Horonjeff/McKelvey* [218] S. 355.

$$EX(T_g) = \sum_i m_i * T_{gi} \quad (8.1)$$

wobei

$EX(T_g)$ : Erwartungswert der durchschnittlichen *Gate Occupancy Time* (GOT)  
aller LFZ (pro Fluggesellschaft)

$m_i$ : Prozentualer Anteil der Luftfahrzeuge der GOT-Klasse i im Verkehrsmix der  
Fluggesellschaft

$T_{gi}$ : erforderliche GOT [min] für Luftfahrzeuge der GOT Klasse i

bereitgestellte Gate – Zeit  $\geq$  nachgefragte Gate – Zeit

$$\gamma_k * \#_k \geq EX(T_g) * C_g \quad (8.2)$$

$\gamma_k$ : Gate-Nutzungsfaktor der Positionsgruppe k (oder Zeitanteil einer Stunde in der die  
Positionen der Gruppe k genutzt werden können)

$\#_k$ : Anzahl der verfügbaren Gate-Positionen der Positionsgruppe k für eine Fluggesellschaft

#### 8.1.2 Taxiway-Kapazität

Für die Bestimmung der Kapazität eines Taxiway, der eine aktive SLB kreuzt, siehe  
*Horonjeff/McKelvey* [218] S. 359.

## 8.2 Anhang B

Im Folgenden wird auf die mathematischen Formeln für eine Auswahl an hierarchisch, agglomerativen Fusionsalgorithmen näher eingegangen, welche in Schritt 4 des Algorithmus (siehe Kapitel 3.2.4) angewendet werden [111] S. 234 ff, S. 285 ff.

### 8.2.1 Nächste-Nachbarn- und Mittelwertverfahren

#### Single Linkage

$$u_{(p+q),i}^{neu} = \min(u_{pi}, u_{qi}) \quad (8.3)$$

wobei

$u_{(p+q),i}^{neu}$ : Unähnlichkeit zwischen dem neuen Cluster  $\{p, q\}$  und den verbliebenen Clustern  $i \triangleq$  bei kardinalskalierten Daten der Distanz zwischen  $\{p, q\}$  und  $i$

#### Complete Linkage

$$u_{(p+q),i}^{neu} = \max(u_{pi}, u_{qi}) \quad (8.4)$$

#### Average Linkage

$$u_{(p+q),i}^{neu} = \frac{u_{p,i} + u_{q,i}}{2} \quad (8.5)$$

### 8.2.2 Clusterzentren-Verfahren

#### Median Linkage

$$u_{(p+q),i}^{neu} = \frac{1}{2}u_{p,i} + \frac{1}{2}u_{q,i} - \frac{1}{4}u_{p,q} \quad (8.6)$$

wobei

$u_{p,i}, u_{q,i}, u_{p,q}$ : Unähnlichkeit (quadrierte euklidische Distanz) zwischen den Clustern  $p$  und  $i$ ,  $q$  und  $i$  bzw.  $p$  und  $q$

#### Centroid Linkage

$$u_{(p+q),i}^{neu} = \frac{n_p}{n_p + n_q}u_{p,i} + \frac{n_q}{n_p + n_q}u_{q,i} - \frac{n_p * n_q}{(n_p + n_q)^2}u_{p,q} \quad (8.7)$$

wobei

$n_p, n_q, n_i$ : Anzahl der Objekte im Cluster  $p$  bzw.  $q$  bzw.  $i$

#### Ward Linkage

$$u_{(p+q),i}^{neu} = \frac{1}{n_p + n_q + n_i} * [(n_p + n_i) * u_{p,i} + (n_q + n_i) * u_{q,i} - n_i * u_{p,q}] \quad (8.8)$$



Die folgenden drei Tabellen sollen an einem einfachen Beispiel aufzeigen, wie die Distanz zwischen einem neuen Cluster (hier Cluster 1) und den verbliebenen Objekten bestimmt wird.

**Tabelle 8-1: Distanzmatrix mit beispielhaften Distanzen zwischen den Objekten, die kleinste Distanz ist rot markiert.**

Distanz zw.	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Objekt 1	0			
Objekt 2	4	0		
Objekt 3	8	10	0	
Objekt 4	5	6	12	0

**Tabelle 8-2: Distanzmatrix mit fusionierten Objekten.**

Distanz zw.	Cluster 1 Objekt 1+2	Objekt 3	Objekt 4
Objekt 1+2	0		
Objekt 3	x	0	
Objekt 4	x	10	0

Welche Werte als neue Distanz zwischen Cluster 1 und Objekt 3 bzw. Objekt 4 in die neue Distanzmatrix eingehen, ist vom Verfahren abhängig und wird in Tabelle 8-3 aufgezeigt.

**Tabelle 8-3: Beispielhafte Berechnung der neuen Distanzen.**

Verfahren	Distanz zw.	Cl. 1 Obj. 1+2	Obj. 3	Obj. 4
<b>Single Linkage</b> $\min(8,10) = 8 \ \& \ \min(5,6) = 5$	Obj. 1+2	0		
	Obj. 3	8	0	
	Obj. 4	5	10	0
<b>Complete Linkage</b> $\max(8,10) = 10 \ \& \ \max(5,6) = 6$	Obj. 1+2	0		
	Obj. 3	10	0	
	Obj. 4	6	10	0
<b>Average Linkage</b> $\frac{8+10}{2} = 9 \ \& \ \frac{5+6}{2} = 5,5$	Obj. 1+2	0		
	Obj. 3	9	0	
	Obj. 4	5,5	10	0
<b>Centroid Linkage</b> $\frac{1}{1+1} 8 + \frac{1}{1+1} 10 - \frac{1+1}{(1+1)^2} 4 = 8$	Obj. 1+2	0		
	Obj. 3	8	0	
	Obj. 4	4,5	10	0
<b>Ward Linkage</b> $\frac{1}{1+1+1} * ((1+1) * 10 + (1+1) * 8 - 1 * 4) = 10,67$	Obj. 1+2	0		
	Obj. 3	10,67	0	
	Obj. 4	6	10	0

## 8.3 Anhang C

### 8.3.1 Flughafenmerkmale

*Tabelle 8-4: Erläuterungen und Einflüsse/Auswirkungen der Flughafenmerkmale.*

Merkmal	Erläuterung	Einfluss/Auswirkung
<b>Anzahl an SLB</b>	Anzahl an SLB eines Flughafens; Bei mehr als 4 SLB wird in dieser Arbeit von einem SLB-System gesprochen	Hoher Einfluss auf die Gesamtkapazität (FB/Zeiteinheit) des Flughafens und folglich auf das jährliche Passagier- und Frachtaufkommen
<b>Anzahl an Abstellpositionen</b>	Anzahl an Abstellpositionen für LFZ, die der Flughafen vorhält; Unterscheidung in Terminalabstellpositionen (mit Fluggastbrücke) und <i>Remote</i> -Abstellpositionen (mit Bustransfer/Fußweg)	Mittlerer Einfluss auf die Gesamtkapazität (FB/Zeiteinheit) des Flughafens und folglich auf das jährliche Passagier- und Frachtaufkommen
<b>SLB Anordnung/Betrieb</b>	Lage der SLB zueinander (parallel, gekreuzt, konvergierend); Bei parallel angeordneten SLB ist der Abstand maßgeblich für die betriebliche Nutzung (abhängiger, unabhängiger Betrieb)	Hoher Einfluss auf die Gesamtkapazität (FB/Zeiteinheit) des Flughafens und folglich auf das jährliche Passagier- und Frachtaufkommen
<b>Max. SLB Länge [m]</b>	Länge der längsten SLB des Flughafens	Auswirkung auf die Größe der LFZ, die ein Flughafen abfertigen kann (Element des ICAO Flughafenreferenzcodes)
<b>Max. SLB Breite [m]</b>	Breite der längsten SLB des Flughafens	Auswirkung auf die Größe der LFZ, die ein Flughafen abfertigen kann
<b>Anzahl an Gates</b>	Anzahl an Gates, die der Flughafen zum Einsteigen der Passagiere in die LFZ vorhält	Geringer Einfluss auf die Gesamtkapazität (FB/Zeiteinheit) des Flughafens und folglich auf das jährliche Passagier- und Frachtaufkommen
<b>Distanz zum Stadtzentrum [km]</b>	Strecke der schnellsten Route vom Flughafen ins Stadtzentrum (Zentrum und Route laut Google Maps)	Auswirkung auf den Passagierkomfort und den <i>QTI Intermodalität</i>
<b>Terminalgröße [m<sup>2</sup>]</b>	Grundfläche der Terminals	Element zur Bestimmung des Level of Service des Flughafens
<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	Summe der Einsteiger, der Aussteiger, der <i>Transit</i> - und der <i>Transfer</i> -Passagiere (doppelt gezählt) eines Flughafens pro Jahr; <i>Transit</i> : Passagiere verbleiben (normalerweise) im LFZ, Flüge mit derselben Flugnummer (z.B. Zwischenlandung zum Auftanken, Aufnahme von zusätzlichen Passagieren, Fracht); <i>Transfer</i> : Passagiere verlassen das LFZ, zwei komplett voneinander getrennte Flüge mit unterschiedlichen Flugnummern	Hohe Auswirkung auf Erlöskennzahlen des Flughafens
<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	Anzahl an Starts und Landungen eines Flughafens pro Jahr	Hohe Auswirkung auf Erlöskennzahlen des Flughafens

<b>Merkmal</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Einfluss/Auswirkung</b>
<b>Arbeitseinheit (WLU/Jahr)</b>	Anzahl an Arbeitseinheiten eines Flughafens pro Jahr; Kombinierte Kennzahl aus Passagier- und Frachtaufkommen; Eine Arbeitseinheit (WLU) entspricht der Abfertigung eines Passagiers oder 100 kg Fracht	Hohe Auswirkung auf Erlöskennzahlen des Flughafens
<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	Ankommende und abfliegende Fracht an einem Flughafen pro Jahr	Hohe Auswirkung auf Erlöskennzahlen des Flughafens
<b>Umsteiger [%]</b>	Summe der <i>Transfer</i> - und <i>Transit</i> -Passagiere eines Flughafens	Kennzahl für einen <i>Hub</i> -Flughafen
<b>Internationale PAX [%]</b>	Anzahl der Passagiere, deren Flugziel im Ausland liegt; Gegenteil zu <i>Domestic</i> -Passagieren.	International Bedeutung eines Flughafens (bei Ländern mit kleiner Staatsfläche oder Stadtstaaten jedoch irreführend)
<b>Verkehrsmix [%]</b>	Vorherrschender Flottenmix an einem Flughafen; Unterteilung in <i>Super</i> -, <i>Heavy</i> -, <i>Medium</i> -, <i>Light</i> -LFZ	Geringer Einfluss auf die Gesamtkapazität (FB/Zeiteinheit) des Flughafens
<b>FB-Anteil pro Fluggesellschaftsklasse [%]</b>	Prozentualer Anteil der Flugbewegungen der einzelnen Fluggesellschaftsklassen an den Gesamtflugbewegungen (FB/Jahr)	Anhaltspunkt für die Ausrichtung des Geschäftsmodells eines Flughafens
<b>Erlös [US\$]</b>	Summe aus flugbezogenen Erlösen (Verkehrserlöse) und nicht-flugbezogenen Erlösen (kommerzielle Erlöse)	Wesentliche betriebswirtschaftliche Kenngröße
<b>Flugbezogener (Verkehrs-) Erlös [%]</b>	Erlöse eines Flughafens, die in direktem Zusammenhang mit der Bereitstellung der Infrastruktur und für die Abwicklung des Flugbetriebs stehen (Lande-, Passagierentgelte)	
<b>Nicht-flugbezogener (kommerzieller) Erlös [%]</b>	Erlöse eines Flughafens die keinen direkten Zusammenhang mit der Bereitstellung der Infrastruktur und für die Abwicklung des Flugbetriebs stehen	Stark Wachsende Bedeutung. Einfluss auf die Höhe der Verkehrsrentgelte (beim <i>Dual-Till</i> Ansatz).
<b>Terminal-Passagierentgelt [US\$]</b>	Entgelt, das ein Flughafen für die Abfertigung eines Passagiers verlangt	
<b>Landeentgelt [US\$]</b>	Entgelt, das ein Flughafen für die Landung/den Start eines LFZ verlangt	
<b>Erlös/PAX [US\$]</b>	Quotient aus dem Erlös und dem Passagieraufkommen eines Flughafens	Wichtiges Maß für die Effizienz eines Flughafens
<b>Minimale Umsteigezeit [min]</b>	Ist die minimale Zeit, die ein Passagier zum Umsteigen von einem LFZ zum anderen benötigt; Abhängig von der Lage der Terminals, ob unterschiedliche Fluggesellschaften involviert sind und ob ein Umstieg von einem internationalen auf einen nationalen Flug erfolgt bzw. umgekehrt	Qualitätsmaß eines <i>Hub</i> -Flughafens
<b>Arbeitseinheit/Arbeiter [WLU/Arbeiter]</b>	Quotient aus den Arbeitseinheiten und der Anzahl der Arbeiter eines Flughafens	Maß über die Effizienz der eingesetzten Arbeiter an einem Flughafen
<b>Flugbewegungen/SLB [FB/SLB]</b>	Quotient aus der Anzahl der Flugbewegungen (pro Jahr) und der Anzahl der SLB eines Flughafens	Maß über die Auslastung der SLB eines Flughafens

### 8.3.2 Korrelationsanalyse der Merkmale des Flughafenbetriebs

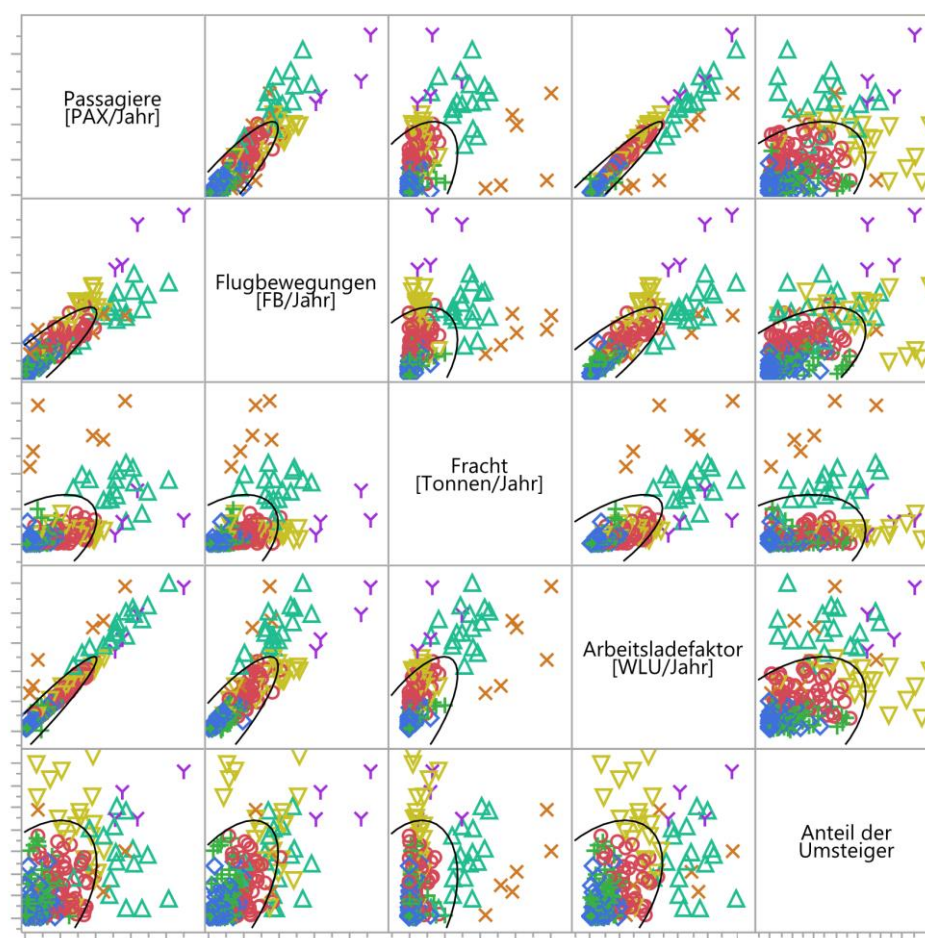


Abbildung 8-1: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Merkmale des Flughafenbetriebs.

Tabelle 8-5: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Merkmale des Flughafenbetriebs.

	Passagiere [PAX/Jahr]	Flug- bewegungen [FB/Jahr]	Fracht [Tonnen/ Jahr]	Arbeitseinheiten [WLU/Jahr]	Anteil der Umsteiger
<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	1,00	0,91	0,56	0,97	0,48
<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	0,91	1,00	0,48	0,87	0,61
<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	0,56	0,48	1,00	0,75	0,34
<b>Arbeitseinheiten [WLU/Jahr]</b>	0,97	0,87	0,75	1,00	0,49
<b>Umsteiger [%]</b>	0,48	0,61	0,34	0,49	1,00

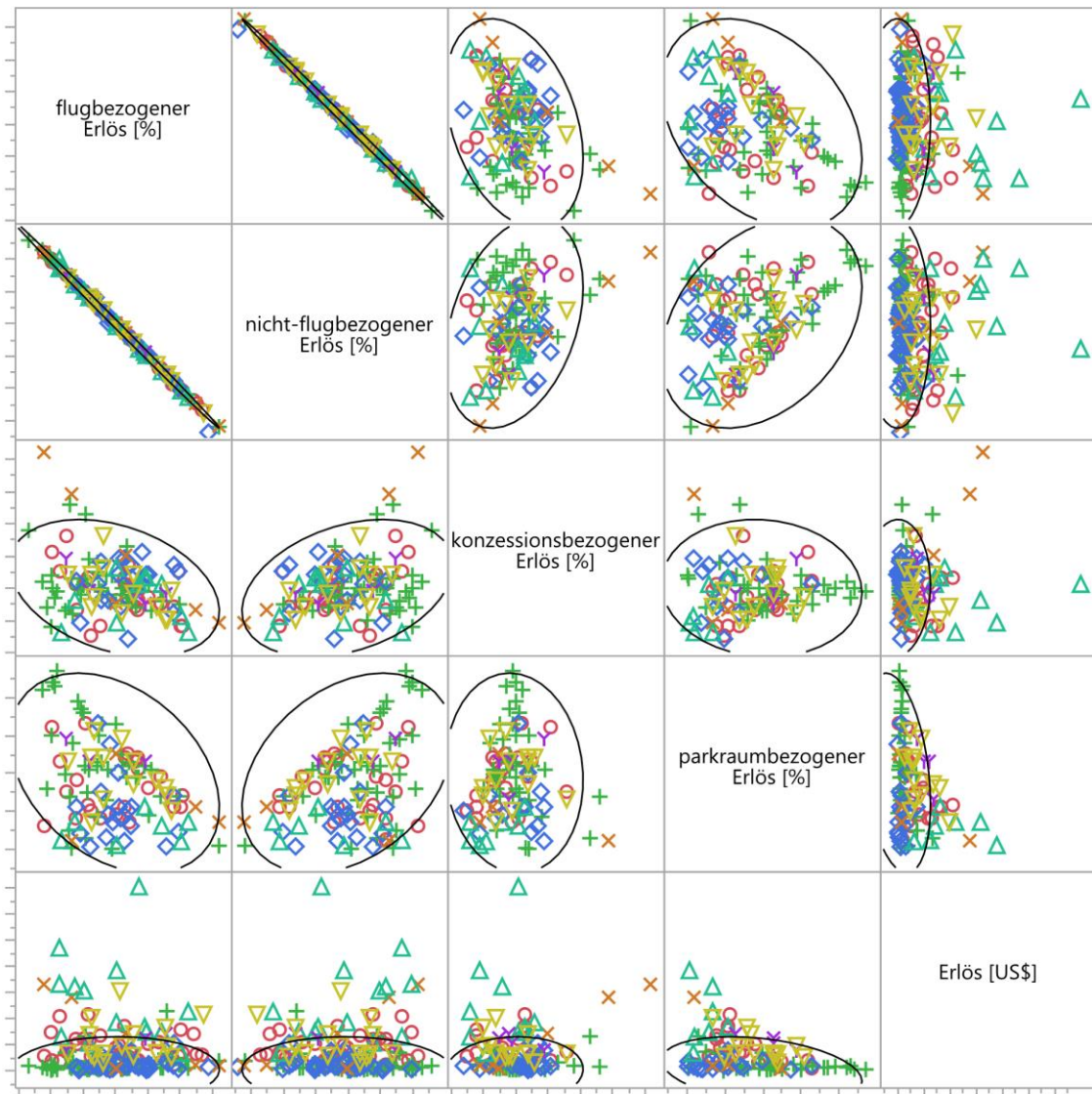


Abbildung 8-2: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Erlösmerkmale von Flughäfen.

Tabelle 8-6: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Erlösmerkmale von Flughäfen.

	Flug- bezogener Erlös [%]	Nicht- flugbezogener Erlös [%]	Konzessions- bezogener Erlös [%]	Parkraum- bezogener Erlös [%]	Erlös [US\$]
<b>Flugbezogener Erlös [%]</b>	1,00	- 0,99	- 0,34	- 0,34	0,03
<b>Nicht-flugbezogener Erlös [%]</b>	- 0,99	1,00	0,33	0,34	- 0,03
<b>Konzessionsbezogener Erlös [%]</b>	- 0,34	0,33	1,00	- 0,07	0,05
<b>Parkraumbezogener Erlös [%]</b>	- 0,34	0,34	- 0,07	1,00	- 0,31
<b>Erlös [US\$]</b>	0,03	- 0,03	0,05	- 0,31	1,00

### 8.3.3 Clusteranalyse I - Flughäfen

*Tabelle 8-7: Ausprägung der Flughafenmerkmale, die in die Clusteranalyse einfließen, blau markiert sind imputierte Werte, gerundet, 2012.*

IATA Code	Passagiere [PAX/Jahr]	Flugbewegungen [FB/Jahr]	Fracht [Tonnen/Jahr]	Anteil der Umsteiger	Anz. d. SLB
CAI	14 711 500	184 405	300 000	0,17	3
CPT	8 505 563	91 486	113 872	0,01	2
DUR	4 668 467	49 673	9 500	0	1
JNB	18 621 259	199 802	413 740	0,27	2
LOS	10 066 460	95 849	171 597	0,08	2
NBO	6 458 614	126 912	172 284	0,36	1
TUN	5 530 694	75 882	102 047	0,1	2
ABQ	5 465 000	97 000	62 000	0,15	4
ALB	2 437 000	50 000	17 000	0,01	2
ANC	5 045 000	185 000	2 611 000	0,14	3
ATL	90 477 000	924 000	669 000	0,66	5
AUS	9 060 000	113 000	76 000	0,08	2
BDL	5 392 000	83 000	111 000	0	3
BNA	9 478 000	143 000	21 000	0,15	4
BOS	28 682 000	352 000	246 000	0,04	6
BUR	4 187 000	67 000	45 000	0,04	2
BWI	22 116 000	257 000	105 000	0,23	4
CLE	8 599 000	172 000	67 000	0,29	3
CLT	38 998 000	520 000	126 000	0,73	4
CMH	6 185 000	106 000	4 000	0,01	2
CVG	5 818 000	139 000	487 000	0,29	4
DAL	7 778 000	120 000	8 000	0,37	3
DCA	18 915 000	281 000	6 000	0,16	3
DEN	51 571 000	614 000	248 000	0,44	6
DFW	55 629 000	640 000	616 000	0,57	7
DTW	31 358 000	426 000	206 000	0,48	6
EWB	33 952 000	411 000	737 000	0,27	3
FLL	22 652 000	228 000	97 000	0,05	3
HNL	17 588 000	211 000	438 000	0,18	4
HOU	9 835 000	140 000	11 000	0,27	4
IAD	21 603 000	295 000	303 000	0,39	4
IAH	38 557 000	513 000	437 000	0,55	5
IND	7 094 000	140 000	1 001 000	0,01	3
JAX	5 212 000	71 000	66 000	0,02	2
JFK	49 010 000	401 000	1 259 000	0,18	4
LAS	39 752 000	488 000	96 000	0,17	4
LAX	62 273 000	589 000	1 728 000	0,24	4
LGA	25 535 000	367 000	7 009	0,07	2
MCI	10 144 000	136 000	87 000	0,1	3
MCO	34 511 000	295 000	168 000	0,05	4
MDW	18 867 000	211 000	24 000	0,34	3
MEM	7 812 000	272 000	3 914 000	0,49	4
MIA	37 072 000	375 000	1 820 000	0,4	4
MKE	7 393 000	117 000	77 000	0,11	5
MSP	31 857 000	410 000	209 000	0,45	4

<b>IATA Code</b>	<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Anteil der Umsteiger</b>	<b>Anz. d. SLB</b>
MSY	8 545 000	102 000	48 000	0,05	3
OAK	9 403 000	134 000	511 000	0,1	3
OKC	3 549 000	63 000	31 000	0,05	4
ONT	4 354 000	72 000	355 000	0,02	2
ORD	64 222 000	870 000	1 505 000	0,45	7
PBI	5 514 000	77 000	17 000	0	2
PDX	13 903 000	187 000	193 000	0,13	3
PHL	29 595 000	433 000	430 000	0,41	4
PHX	39 359 000	436 000	266 000	0,42	3
PIT	7 746 000	118 000	80 000	0,01	4
PVD	3 757 000	54 000	10 000	0,01	2
RDU	8 892 000	144 000	87 000	0,02	3
RIC	3 125 000	68 000	39 000	0	3
RNO	3 434 000	51 000	53 000	0,03	3
RSW	7 138 000	70 000	15 000	0	1
SAN	17 155 000	176 000	121 000	0,07	1
SAT	8 040 000	117 000	122 000	0,07	2
SDF	3 233 000	134 000	2 176 000	0,01	3
SEA	32 179 000	306 000	280 000	0,24	3
SFO	41 665 000	400 000	398 000	0,2	4
SJC	8 234 000	104 000	47 000	0,05	2
SLC	19 266 000	274 000	150 000	0,45	3
SMF	8 722 000	102 000	61 000	0,07	2
SNA	8 569 000	91 000	14 000	0,03	1
STL	12 321 000	182 000	71 000	0,16	4
TPA	16 360 000	165 000	86 000	0,06	3
TUL	2 694 000	56 000	54 000	0,04	3
TUS	3 470 000	55 000	27 000	0,01	3
YEG	6 672 000	129 000	23 000	0,1	2
YHZ	3 506 000	75 000	26 000	0,2	2
YOW	4 483 000	121 000	10 000	0,1	3
YQB	1 411 000	80 000	2 000	0,08	2
YQR	1 173 000	34 000	0	0,04	2
YUL	13 431 000	216 000	77 000	0,18	3
YVR	17 077 000	287 000	190 000	0,23	3
YWG	3 423 000	108 000	65 000	0,07	2
YYC	12 843 000	219 000	84 000	0,18	3
YYJ	1 470 000	70 000	5 000	0,01	3
YYT	1 413 000	35 000	9 000	0,03	3
YYZ	34 090 000	421 000	344 000	0,26	5
AUH	14 700 000	121 638	567 965	0,62	2
BAH	7 371 651	90 837	245 146	0,54	2
BKK	52 369 000	327 000	1 361 000	0,25	2
BLR	15 240 000	130 025	272 613	0,08	1
BOM	30 208 000	244 000	635 000	0,18	2
CAN	48 309 000	373 000	1 249 000	0,1	2
CEI	926 000	7 000	5 000	0	1
CGK	57 773 000	370 000	630 000	0,04	2
CJU	18 443 000	121 000	245 000	0,03	2
CMB	7 819 847	52 000	187 000	0,33	1

<b>IATA Code</b>	<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Anteil der Umsteiger</b>	<b>Anz. d. SLB</b>
CNX	4 335 000	36 000	21 000	0	1
DEL	34 368 000	281 000	546 000	0,16	3
DOH	21 163 382	155 672	844 532	0,66	1
DXB	57 700 000	344 000	2 280 000	0,48	2
GMP	19 429 000	130 000	255 000	0,03	2
GUM	2 714 000	49 000	30 000	0,18	2
HAK	10 697 000	87 000	175 000	0,01	1
HDY	2 013 000	15 000	16 000	0	1
HKG	57 200 000	352 000	4 040 000	0,3	2
HKT	9 161 000	59 000	32 000	0,01	1
HND	66 795 000	387 000	847 000	0,04	4
ICN	38 971 000	254 000	3 059 000	0,2	3
JED	27 111 000	208 209	265 600	0,08	3
KIX	16 799 000	124 000	687 000	0,07	2
KUL	39 888 000	282 000	673 000	0,18	2
MAA	12 777 000	117 000	316 000	0,1	2
MCT	7 546 715	73 842	113 269	0,35	2
MFM	4 366 000	42 000	28 000	0,04	1
MNL	32 100 000	236 000	460 135	0,04	2
NGO	9 211 000	81 000	135 000	0,05	1
NRT	32 794 000	209 000	1 952 000	0,25	2
PEK	81 929 000	539 000	1 800 000	0,08	3
PEN	4 768 000	50 000	123 000	0,01	1
PNH	2 077 000	23 000	29 070	0,04	1
PUS	9 196 000	72 000	225 578	0,09	2
PVG	44 880 000	362 000	2 938 000	0,11	3
REP	2 223 000	26 000	500	0,04	1
RUH	17 060 000	149 256	350 000	0,16	2
SHA	33 829 000	244 000	430 000	0,01	2
SIN	51 941 000	325 000	1 806 000	0,29	2
SUB	15 259 000	141 000	102 000	0,06	1
SZX	29 570 000	240 000	855 000	0,01	2
TPE	27 837 000	181 000	1 578 000	0,18	2
XMN	17 354 000	146 000	271 000	0,04	1
AGP	12 582 000	102 000	3 000	0	2
ALC	8 855 000	62 000	3 000	0	1
AMS	51 036 000	423 000	1 512 000	0,41	5
ARN	19 543 000	211 000	146 000	0,11	3
ATH	12 944 000	153 000	76 000	0,14	2
AYT	24 993 667	156 342	569 834	0,01	3
BCN	35 145 000	290 000	97 000	0,05	3
BEG	3 364 000	45 000	8 000	0,09	1
BGY	8 891 000	74 000	117 000	0	1
BHX	8 923 000	90 000	19 000	0,01	1
BLL	2 734 807	50 021	61 666	0,01	1
BLQ	5 959 000	68 000	41 000	0,02	1
BRS	5 922 000	61 000	3 000	0	1
BRU	18 971 000	223 000	459 000	0,2	3
BSL	5 355 000	87 000	94 000	0,05	2
BTS	1 416 000	23 000	23 000	0	2



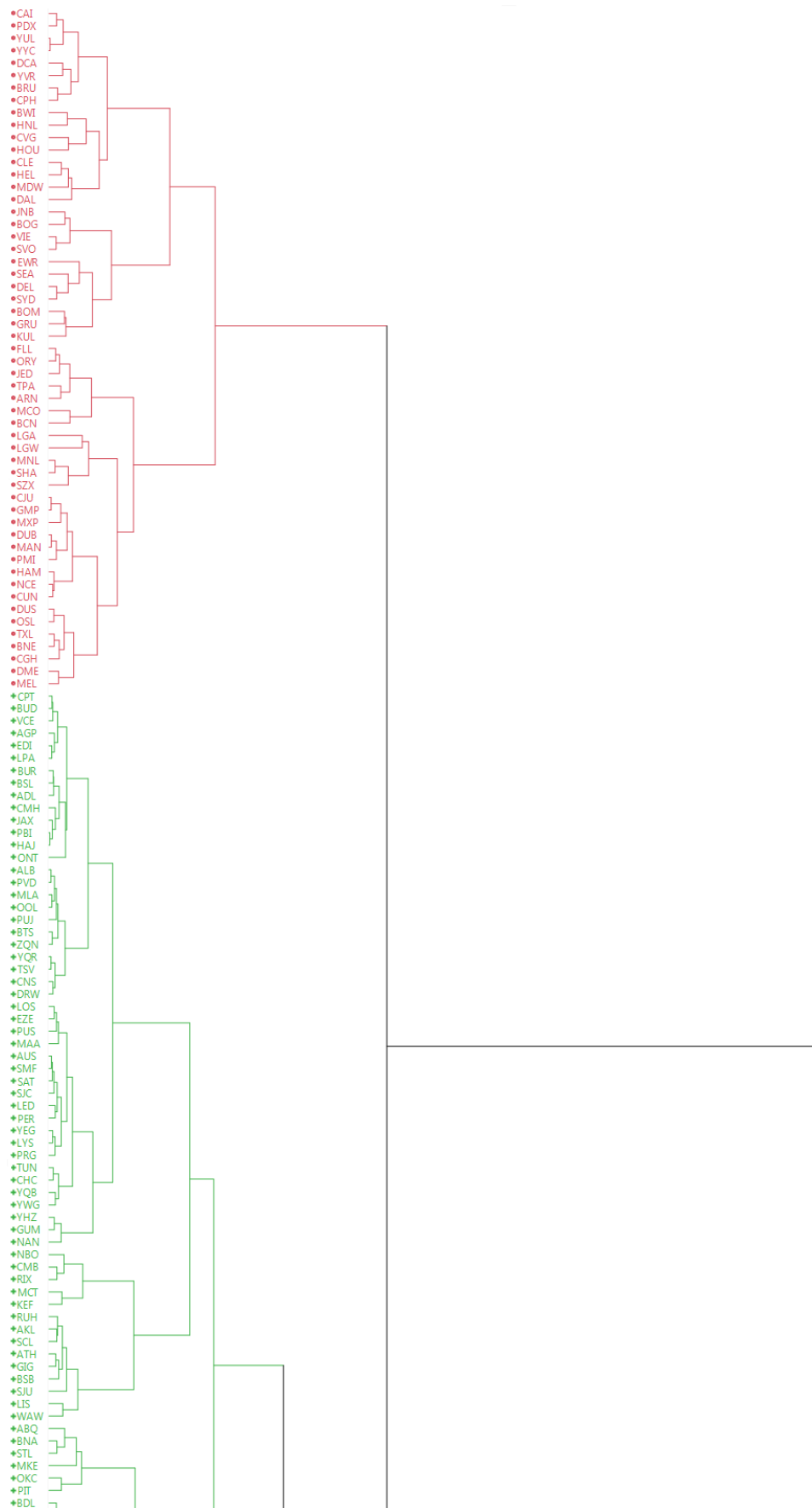
<b>IATA Code</b>	<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Anteil der Umsteiger</b>	<b>Anz. d. SLB</b>
BUD	8 504 000	88 000	93 000	0,02	2
CDG	61 612 000	491 000	2 151 000	0,31	4
CGN	9 282 000	125 000	751 000	0,01	3
CIA	4 499 000	51 000	17 000	0	1
CPH	23 336 000	243 000	354 000	0,22	3
DME	28 200 000	253 500	196 984	0,12	2
DRS	1 871 113	25 162	247	0,01	1
DUB	19 100 000	157 000	103 000	0,03	2
DUS	20 830 000	217 000	102 000	0,12	2
EDI	9 195 000	107 000	43 000	0	2
FCO	37 063 000	314 000	136 000	0,26	4
FMO	1 013 430	24 965	143	0,01	1
FRA	52 520 000	482 000	2 066 000	0,5	3
GLA	7 153 000	73 000	10 000	0	1
GVA	13 859 000	168 000	75 000	0,04	1
HAJ	5 288 000	80 000	16 000	0,01	2
HAM	13 698 000	153 000	65 000	0,03	2
HEL	14 858 000	174 000	192 000	0,25	3
HHN	2 649 585	28 461	175 705	0	1
IST	44 999 000	349 000	1 232 000	0,37	3
KEF	2 380 000	27 000	39 000	0,3	2
LCA	5 166 224	62 857	28 538	0,04	1
LCY	3 016 664	70 781	0	0,03	1
LED	11 155 000	126 000	31 000	0,06	2
LGW	34 241 000	238 000	100 000	0,03	1
LHR	69 985 000	471 000	1 465 000	0,28	2
LIN	8 605 000	96 000	20 000	0,08	1
LIS	15 315 000	145 000	101 000	0,28	2
LJU	1 199 000	24 000	17 000	0,14	1
LPA	9 892 000	100 000	21 000	0,02	2
LTN	9 618 000	97 000	30 000	0	1
LUX	1 920 000	78 000	615 000	0,01	1
LYS	8 451 000	117 000	37 000	0,09	2
MAD	45 195 000	373 000	359 000	0,3	4
MAN	19 841 000	169 000	99 000	0,02	2
MLA	3 659 000	28 000	16 000	0,01	2
MUC	38 217 000	385 000	290 000	0,37	2
MXP	17 231 000	171 000	414 000	0,04	2
NAP	5 802 000	61 000	5 000	0,01	1
NCE	11 190 000	162 000	18 000	0,01	2
NRN	2 206 898	17 025	0	0	1
NUE	3 570 748	50 434	7 584	0,06	1
OPO	6 050 000	58 000	35 000	0,03	1
ORY	27 232 000	231 000	106 000	0,04	3
OSL	22 080 000	230 000	105 000	0,14	2
PMI	22 667 000	174 000	14 000	0,04	2
PRG	10 808 000	132 000	53 000	0,11	2
RIX	4 768 000	69 000	33 000	0,33	1
SAW	14 873 000	125 000	29 000	0,12	1
SOF	3 467 000	44 000	16 000	0,05	1

<b>IATA Code</b>	<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	<b>Flugbewegungen [FB/Jahr]</b>	<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	<b>Anteil der Umsteiger</b>	<b>Anz. d. SLB</b>
STN	17 457 000	144 000	215 000	0	1
STR	9 735 000	101 000	32 000	0,02	1
SVO	26 188 000	228 868	305 000	0,33	2
SXF	7 082 828	65 053	5 913	0	1
SZG	1 666 000	17 000	8 000	0,01	1
TFS	8 530 729	56 210	3 906	0,01	1
TLL	2 207 000	49 000	34 000	0,11	1
TLV	13 134 000	98 000	286 000	0,01	3
TRN	3 522 000	52 000	11 000	0,01	1
TXL	18 164 000	171 000	27 000	0,1	2
VCE	8 188 000	79 000	41 000	0,01	2
VIE	22 166 000	245 000	252 000	0,31	2
WAW	9 588 000	118 000	42 000	0,22	2
ZAG	2 342 000	39 000	9 000	0,23	1
ZRH	24 802 000	270 000	418 751	0,35	3
ADL	7 099 000	75 000	17 200	0,04	2
AKL	14 006 000	154 000	214 000	0,19	2
BNE	21 182 000	178 000	89 000	0,1	2
CHC	5 552 000	73 000	28 000	0,09	2
CNS	3 943 000	44 000	5 500	0,07	2
DRW	2 045 000	27 000	316	0,06	2
DUD	854 000	25 000	0	0,01	1
MEL	28 918 000	206 000	243 500	0,08	2
NAN	1 718 012	17 000	118 205	0,16	2
NTL	1 184 000	17 000	0	0,01	1
OOL	5 327 000	36 000	5 400	0,01	2
PER	12 633 000	94 000	74 000	0,07	2
SYD	35 987 000	325 000	541 000	0,15	3
TSV	1 693 000	28 000	29 076	0,05	2
WLG	5 374 000	90 000	46 072	0,11	1
ZQN	1 047 000	11 000	0	0,02	2
BOG	22 525 973	275 123	637 153	0,25	2
AEP	8 849 465	123 272	18 945	0,14	1
BSB	15 891 530	194 686	60 685	0,17	2
CGH	16 775 770	213 419	60 345	0,07	2
CUN	12 439 266	166 795	104 273	0,01	2
EZE	8 880 289	116 549	142 246	0,11	2
GIG	17 495 737	154 318	114 097	0,15	2
GRU	32 777 330	273 882	448 274	0,25	2
GYE	3 934 203	199 199	198 199	0,18	1
HAV	2 685 578	38 318	0	0,02	1
LIM	13 324 379	148 326	293 675	0,25	1
PTY	6 962 608	110 206	116 332	0,69	2
PUJ	481 774	52 864	0	0,01	2
SCL	14 168 282	184 582	223 203	0,16	2
SJU	8 448 172	182 441	14 929	0,12	2

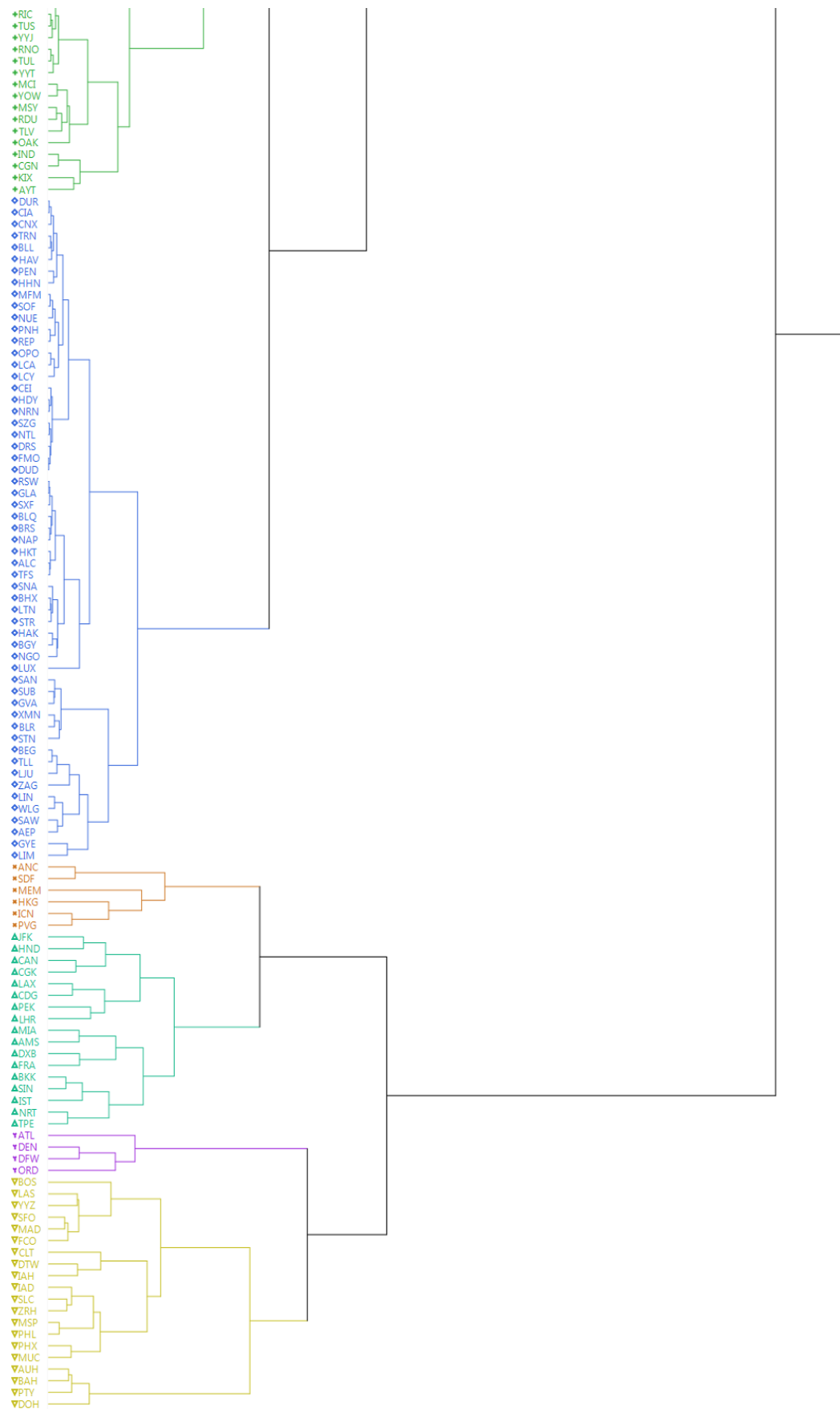
Tabelle 8-8: Clusterverlauf der Clusteranalyse I.

Anzahl der Cluster	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet	Anzahl der Cluster	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet
240	0,0068	FMO	DUD	119	0,4076	MSY	TLV
239	0,0157	RSW	GLA	118	0,4132	CAI	YUL
238	0,0191	DUR	CIA	117	0,4361	NBO	CMB
237	0,0222	HDY	NRN	116	0,4389	LIN	SAW
236	0,0240	SZG	NTL	115	0,4389	DUS	TXL
235	0,0274	PBI	HAI	114	0,4467	DUR	MFM
234	0,0346	YUL	YYC	113	0,4521	BOM	GRU
233	0,0382	ALC	TFS	112	0,4548	ABQ	BNA
232	0,0383	RSW	SXF	111	0,4640	JNB	BOG
231	0,0408	BRS	NAP	110	0,4672	ALB	YQR
230	0,0466	DRS	FMO	109	0,4805	RSW	SNA
229	0,0513	MFM	SOF	108	0,4817	BUR	ONT
228	0,0530	PNH	REP	107	0,4955	BOM	KUL
227	0,0572	HKT	ALC	106	0,5007	SFO	MAD
226	0,0597	YQR	TSV	105	0,5145	RUH	SJU
225	0,0601	ALB	PVD	104	0,5213	CPT	BUR
224	0,0630	CJU	GMP	103	0,5221	LOS	AUS
223	0,0635	BHX	LTN	102	0,5309	CJU	DUB
222	0,0668	TRN	BLL	101	0,5351	BWI	HNL
221	0,0681	SZG	DRS	100	0,5356	BKK	SIN
220	0,0692	RIC	TUS	99	0,5595	SEA	DEL
219	0,0696	OPO	LCA	98	0,5616	MNL	SZX
218	0,0702	DUB	MAN	97	0,5660	CLE	MDW
217	0,0737	AUS	SMF	96	0,5691	CVG	HOU
216	0,0737	RNO	TUL	95	0,5694	SLC	ZRH
215	0,0770	CEI	HDY	94	0,5790	MCI	MSY
214	0,0816	BHX	STR	93	0,5826	GYE	LIM
213	0,0823	EDI	LPA	92	0,5912	NRT	TPE
212	0,0830	DUR	CNX	91	0,6019	SFO	FCO
211	0,0835	BLQ	BRS	90	0,6068	FLL	TPA
210	0,0853	MLA	OOL	89	0,6095	JNB	VIE
209	0,0883	CPT	BUD	88	0,6112	MCO	BCN
208	0,0952	TRN	HAV	87	0,6186	DUR	CEI
207	0,0961	BTS	ZQN	86	0,6233	AUH	BAH
206	0,0967	JAX	PBI	85	0,6397	DCA	BRU
205	0,0969	AUS	SAT	84	0,6497	MCI	OAK
204	0,1074	YEG	LYS	83	0,6506	BEG	ZAG
203	0,1104	RSW	BLQ	82	0,6612	CLE	DAL
202	0,1105	BEG	TLL	81	0,6857	CJU	HAM
201	0,1107	CPT	VCE	80	0,6858	LOS	TUN
200	0,1120	NCE	CUN	79	0,7018	PHX	MUC
199	0,1128	CEI	SZG	78	0,7132	IAD	SLC
198	0,1147	RIC	YYJ	77	0,7183	AUH	PTY
197	0,1156	CNS	DRW	76	0,7246	DUS	DME
196	0,1219	HAK	BGY	75	0,7253	ICN	PVG
195	0,1229	BUR	BSL	74	0,7401	LAX	CDG
194	0,1232	TUN	CHC	73	0,7811	KIX	AYT
193	0,1251	SNA	BHX	72	0,7975	ABQ	MKE
192	0,1258	MFM	NUE	71	0,8273	ANC	SDF
191	0,1364	BUR	ADL	70	0,8413	RUH	LIS
190	0,1436	RNO	YYT	69	0,8477	CAN	CGK
189	0,1436	DUS	OSL	68	0,8552	CAI	DCA
188	0,1453	AUS	SJC	67	0,8827	EWR	SEA
187	0,1479	HAM	NCE	66	0,8915	LAS	YYZ
186	0,1518	TXL	BNE	65	0,8984	DTW	IAH
185	0,1527	LOS	EZE	64	0,9352	LAS	SFO
184	0,1535	DUR	TRN	63	0,9454	MIA	AMS
183	0,1568	YHZ	GUM	62	0,9475	DEN	DFW
182	0,1589	AGP	EDI	61	0,9488	ABQ	OKC
181	0,1602	PEN	HHN	60	0,9504	BEG	LIN
180	0,1626	ALB	MLA	59	0,9595	RSW	LUX
179	0,1677	SUB	GVA	58	0,9628	DXB	FRA

Anzahl der Cluster	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet	Anzahl der Cluster	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet
178	0,1750	OPO	LCY	57	0,9677	LGA	LGW
177	0,1782	MNL	SHA	56	0,9755	IND	KIX
176	0,1785	YEG	PRG	55	0,9843	NBO	MCT
175	0,1790	YQR	CNS	54	1,0462	BKK	IST
174	0,1851	LED	PER	53	1,0825	BWI	CVG
173	0,1861	XMN	BLR	52	1,0847	JFK	HND
172	0,1892	CMH	JAX	51	1,1396	CPT	ALB
171	0,1893	YQB	YWG	50	1,1562	LGA	MNL
170	0,1893	LIN	WLG	49	1,2150	BDL	MCI
169	0,1928	SAN	SUB	48	1,2195	BEG	GYE
168	0,1968	FLL	ORY	47	1,2378	FLL	MCO
167	0,2018	ATH	GIG	46	1,2602	AUH	DOH
166	0,2026	MFM	PNH	45	1,2652	EWR	BOM
165	0,2096	VIE	SVO	44	1,2709	DUR	RSW
164	0,2110	RSW	HKT	43	1,2766	LOS	YHZ
163	0,2169	DUB	PMI	42	1,3029	PEK	LHR
162	0,2170	BDL	RIC	41	1,3897	IAD	MSP
161	0,2186	ALB	PUJ	40	1,4064	CJU	DUS
160	0,2221	LOS	PUS	39	1,4619	BWI	CLE
159	0,2247	CAI	PDX	38	1,6035	IAD	PHX
158	0,2272	DEL	SYD	37	1,6165	CLT	DTW
157	0,2288	AKL	SCL	36	1,6976	CAI	BWI
156	0,2321	CMB	RIX	35	1,7371	LAX	PEK
155	0,2333	BNA	STL	34	1,7676	JFK	CAN
154	0,2397	AUS	LED	33	1,8195	JNB	EWR
153	0,2470	MSY	RDU	32	1,8490	SAN	BEG
152	0,2506	RUH	AKL	31	1,8578	CPT	LOS
151	0,2522	CPT	AGP	30	1,8635	HKG	ICN
150	0,2525	BRU	CPH	29	1,8711	BKK	NRT
149	0,2539	DUR	PEN	28	1,9329	BOS	LAS
148	0,2624	HAK	NGO	27	1,9893	LGA	CJU
147	0,2627	ALB	BTS	26	2,0685	DEN	ORD
146	0,2628	BEG	LJU	25	2,0826	MIA	DXB
145	0,2676	MCI	YOW	24	2,1484	BDL	IND
144	0,2760	LOS	MAA	23	2,4591	FLL	LGA
143	0,2768	SAW	AEP	22	2,4682	NBO	RUH
142	0,2776	TUN	YQB	21	2,5065	ABQ	BDL
141	0,2784	DME	MEL	20	2,6764	ATL	DEN
140	0,2818	SNA	HAK	19	2,7576	DUR	SAN
139	0,2857	ATH	BSB	18	2,8352	JFK	LAX
138	0,2939	BUR	CMH	17	2,8819	MEM	HKG
137	0,2981	TXL	CGH	16	2,9298	MIA	BKK
136	0,3047	IND	CGN	15	3,0527	CLT	IAD
135	0,3074	FLL	JED	14	3,4693	BOS	CLT
134	0,3077	BDL	RNO	13	3,5191	CAI	JNB
133	0,3077	MFM	OPO	12	3,5979	ANC	MEM
132	0,3317	MSP	PHL	11	3,8857	JFK	MIA
131	0,3334	XMN	STN	10	4,0971	CPT	NBO
130	0,3453	TPA	ARN	9	4,7950	CPT	ABQ
129	0,3456	CJU	MXP	8	4,8356	CAI	FLL
128	0,3554	YHZ	NAN	7	6,2287	BOS	AUH
127	0,3592	AUS	YEG	6	6,5344	ANC	JFK
126	0,3613	CLE	HEL	5	6,8239	CPT	DUR
125	0,3613	OKC	PIT	4	8,0065	ATL	BOS
124	0,3773	MCT	KEF	3	9,8318	CAI	CPT
123	0,3874	SAN	XMN	2	10,4614	ANC	ATL
122	0,3928	RUH	ATH	1	22,4885	CAI	ANC
121	0,4004	DCA	YVR				
120	0,4052	LIS	WAW				



**Abbildung 8-3: Dendrogramm Clusteranalyse I (Teil I), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA 3-Letter-Code, vor der Silhouettenoptimierung.**



**Abbildung 8-4: Dendrogramm Clusteranalyse I (Teil 2), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA 3-Letter-Code, vor der Silhouettenoptimierung.**

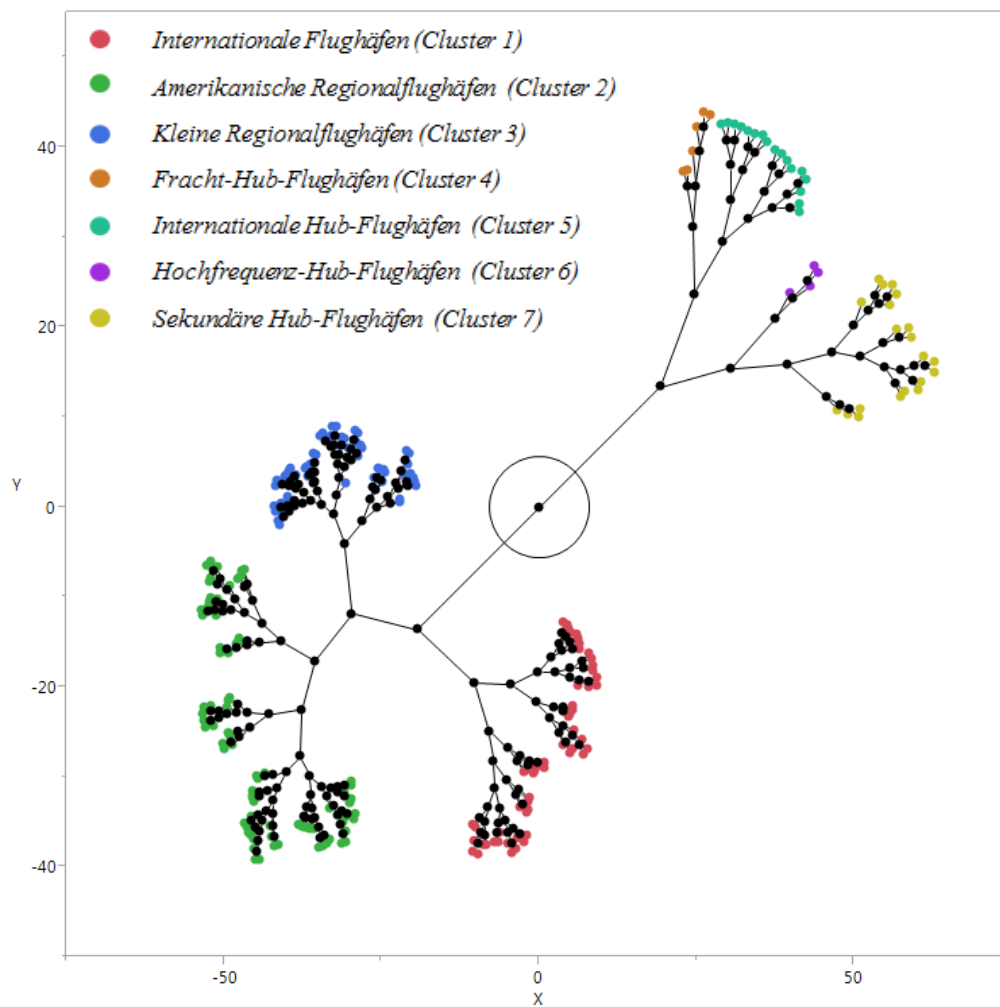


Abbildung 8-5: Konstellationsdiagramm der Clusteranalyse I, vor der Silhouettenoptimierung.

### 8.3.4 Ergebnisse Clusteranalyse I, Flughafenklassen

**Tabelle 8-9: Flughäfen pro Cluster, angegeben ist der IATA 3-Letter-Code<sup>197</sup>, unterstrichen sind die Flughäfen, die im Zuge der Silhouettenoptimierung die Clusterzugehörigkeit gewechselt haben.**

Cl	Region	Clusterelemente (Flughäfen)
1	Afrika	CAI;JNB
	Nordamerika	<u>BOS</u> ;BWI;CLE;CVG;DCA;EWR;FLL;HNL;HOU;LGA;MCO;MDW;PDX;SEA; <u>STL</u> ;YUL;YVR;YYC
	Asien/Pazifik	BOM; <u>CGK</u> ;DEL;KUL;MNL;SHA;SZX; <u>TPE</u> ;BAH;JED
	Europa	ARN;BCN;BRU;CPH;DUS; <u>FCO</u> ;HEL;LGW; <u>LIS</u> ;MUC;ORY;OSL;PMI;VIE; <u>ZRH</u> ; <u>AYT</u> ;DME;SVO
	Ozeanien	BNE;MEL;SYD
	Süd- und Mittelamerika	BOG; <u>BSB</u> ;CGH;GRU
2	Afrika	CPT;LOS;TUN
	Nordamerika	ABQ;ALB;AUS;BDL;BNA;BUR;CMH; <u>DAL</u> ;IND;JAX;MCI;MKE;MSY;OAK;OKC;ONT;PBI;PIT;PVD;RDU;RIC;RNO;SAT;SJC;SMF; <u>TPA</u> ;TUL;TUS;YEG;YHZ;YOW;YQB;YQR;YWG;YYJ;YYT
	Asien/Pazifik	<u>CJU</u> ;GMP;GUM;KIX;MAA;PUS;MCT;RUH
	Europa	AGP;ATH;BSL;BUD;CGN; <u>DUB</u> ;EDI;HAJ; <u>HAM</u> ;KEF;LED;LPA;LYS; <u>MAN</u> ;MLA; <u>MXP</u> ;NCE;PRG;TLV;TXL;VCE;WAW
	Ozeanien	ADL;AKL;CHC;CNS;DRW;NAN;OOL;PER;TSV
	Süd- und Mittelamerika	<u>CUN</u> ;EZE;GIG;PUJ;SCL;SJU
3	Afrika	DUR; <u>NBO</u>
	Nordamerika	RSW;SAN;SNA
	Asien/Pazifik	CEI; <u>CMB</u> ;CNX;HAK;HDY;HKT;MFM;NGO;PEN;PNH;REP;SUB;XMN;BLR
	Europa	ALC;BEG;BGY;BHX;BLQ;BRS; <u>BTS</u> ;CIA;GLA;GVA;LIN;LJU;LTN;LUX;NAP;OPO; <u>RIX</u> ;SAW;SOF;STN;STR;SZG;TLL;TRN;ZAG;BLL;DRS;FMO;HHN;LCA;LCY;NRN;NUE;SXF;TFS
	Ozeanien	DUD;NTL;WLG; <u>ZQN</u>
	Süd- und Mittelamerika	AEP;GYE;HAV;LIM
4	Nordamerika	ANC;MEM;SDF
	Asien/Pazifik	HKG;ICN;PVG
5	Nordamerika	JFK;LAX;MIA
	Asien/Pazifik	BKK;CAN;DXB;HND;NRT;PEK;SIN
	Europa	AMS;CDG;FRA;IST;LHR
6	Nordamerika	ATL;DEN;DFW;ORD
7	Nordamerika	CLT;DTW;IAD;IAH;LAS;MSP;PHL;PHX;SFO;SLC;YYZ
	Asien/Pazifik	AUH;DOH
	Europa	MAD
	Süd- und Mittelamerika	PTY

<sup>197</sup> Eine Suchfunktion für IATA 3-Letter-Codes von Flughäfen ist unter [www.world-airport-codes.com](http://www.world-airport-codes.com) zu finden, zuletzt geprüft am 20. Februar 2018.



**Tabelle 8-10: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (1).**

CI	Name	Passagiere [PAX/Jahr] x 1000			Flugbewegungen [FB/Jahr] x 1000			Fracht [Tonnen/Jahr] x 1000		
		25 % Quantil	Median	75 % Quantil	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	Internationale FH	17 077	22 667	32 100	195	230	281	97	197	443
2	Große Regional-FH	4 004	8 114	11 068	71	102	130	21	53	101
3	Kleine Regional-FH	2 312	4 967	8 864	38	60	90	8	21	89
4	Fracht-Hub-FH	4 592	23 392	47 960	172	263	355	2 502	2 999	3 946
5	Internationale Hub-FH	48 309	52 369	62 273	344	387	482	1 259	1 728	1 952
6	Hochfrequenz-Hub-FH	52 589	59 926	83 913	621	755	911	340	643	1 296
7	Sekundäre Hub-FH	21 163	31 857	39 359	274	410	436	150	303	430

**Tabelle 8-11: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (2).**

CI	Umsteiger [%]			Anzahl SLB			Verkehrsmix S [%]			Verkehrsmix H [%]		
	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	7,4	17,3	25,5	2	3	3	0,0	0,0	0,0	4,3	9,4	16,2
2	1,4	4,9	10,1	2	2	3	0,0	0,0	0,0	0,8	2,6	10,7
3	0,5	1,6	6,5	1	1	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	7,6
4	8,8	17,4	34,5	3	3	3	0,0	0,1	1,6	0,2	18,2	61,8
5	17,5	28,2	40,1	2	3	4	0,1	0,8	1,6	22,0	36,9	53,2
6	44,5	50,7	63,7	5	6	7	0,0	0,0	0,0	6,6	9,1	18,8
7	30,1	44,6	62,4	3	4	4	0,0	0,0	0,1	6,3	9,7	18,4

**Tabelle 8-12: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (3).**

CI	Verkehrsmix M [%]			Verkehrsmix L [%]			Erlös/PAX [US\$]		
	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	83,3	89,4	94,5	0,0	0,0	0,3	12,0	16,5	24,5
2	86,3	95,6	98,6	0,0	0,0	0,3	11,9	15,5	22,1
3	90,5	98,1	99,9	0,0	0,0	0,1	12,1	16,0	20,2
4	36,4	74,6	96,8	0,0	0,0	6,4	15,4	19,1	30,7
5	46,1	62,3	76,6	0,0	0,0	0,0	13,4	23,1	34,8
6	81,0	90,7	92,5	0,1	0,2	0,9	5,7	10,3	11,8
7	81,2	89,9	93,7	0,0	0,0	0,3	8,2	8,9	20,0

**Tabelle 8-13: Clusteranalyse I - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (4).**

CI	Erlös [US\$] x 1000			Distanz zum Stadtzentrum [km]			Terminalgröße [m²] x 1000		
	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	220 173	364 781	679 274	13	19	24	145	200	332
2	58 024	101 477	202 333	11	15	22	47	68	99
3	47 332	83 142	139 500	8	12	24	16	45	75
4	83 104	410 105	1 465 786	10	26	48	80	384	753
5	739 607	1 130 171	1 787 728	18	29	31	537	632	1 300
6	429 336	576 500	687 889	21	33	39	509	523	608
7	272 986	331 259	640 050	12	19	34	287	318	462

## 8.4 Anhang D

### 8.4.1 Merkmale der Fluggesellschaften

*Tabelle 8-14: Erläuterungen und Einflüsse/Auswirkungen der Merkmale von Fluggesellschaften.*

<b>Merkmal</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Einfluss/Auswirkung</b>
<b>Passagiere [PAX/Jahr]</b>	Anzahl an Passagieren, die eine Fluggesellschaft pro Jahr transportiert	Auswirkung auf die Höhe der Erlöse einer Fluggesellschaft
<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	Menge an Fracht, die eine Fluggesellschaft pro Jahr transportiert	Auswirkung auf die Höhe der Erlöse bestimmter Fluggesellschaften (abhängig vom Geschäftsmodell)
<b>Ø transportierte Passagiere [PAX]</b>	Durchschnittlich pro Flug transportierte Anzahl an Passagieren; Quotient aus den Passagieren und den LFZ-Abflügen	
<b>Ø transportierte Fracht [Tonnen]</b>	Durchschnittlich pro Flug transportierte Menge an Fracht; Quotient aus der Fracht und den LFZ-Abflügen	
<b>Passagierkilometer [Pkm]</b>	Summenprodukt aus den Passagieren eines Fluges und der dabei zurückgelegten Entfernung eines Fluges in Kilometern über alle Flüge der Flotte einer Fluggesellschaft	Maß für die tatsächlich erbrachte Beförderungsleistung im Passagierverkehr; auch als Verkehrsleistung bezeichnet
<b>Tonnenkilometer [Tkm], PAX + Fracht</b>	Summenprodukt aus der Anzahl der Passagiere und der Masse der Fracht in Tonnen eines Fluges und der dabei zurückgelegten Entfernung eines Fluges in Kilometern über alle Flüge der Flotte einer Fluggesellschaft	Maß für die tatsächlich erbrachte Transportleistung im gemischten Passagier-/Frachtverkehr, auch als Verkehrsleistung bezeichnet
<b>Anzahl an Luftfahrzeugen</b>	Größe der Flotte einer Fluggesellschaft zu einem bestimmten Zeitpunkt	
<b>LFZ-Kilometer [km]</b>	Summe der geflogenen Kilometer der Flotte einer Fluggesellschaft pro Jahr	
<b>LFZ-Flugstunden [h]</b>	Summe der Flugstunden der Flotte einer Fluggesellschaft pro Jahr	
<b>Anzahl an Sitzen</b>	Summe der Anzahl an Sitzen aller LFZ der Flotte einer Fluggesellschaft	
<b>LFZ-Abflüge [FB]</b>	Anzahl an Flugbewegungen einer Fluggesellschaft pro Jahr	
<b>Sitzplatzkilometer verfügbar [Skkm]</b>	Summenprodukt aus den verfügbaren Sitzplätzen eines LFZ und der dabei zurückgelegten Entfernung eines Fluges in Kilometern über alle Flüge der Flotte einer Fluggesellschaft	Maß für die angebotene Beförderungsleistung einer Fluggesellschaft im Passagierverkehr
<b>Tonnenkilometer verfügbar [Tkm], PAX + Fracht</b>	Summenprodukt aus den verfügbaren Sitzplätzen eines LFZ und der verfügbaren Frachtladefähigkeit in Tonnen eines Fluges und der dabei zurückgelegten Entfernung eines Fluges in Kilometern über alle Flüge der Flotte einer Fluggesellschaft	Maß für die angebotene Transportleistung einer Fluggesellschaft im gemischten Passagier-/Frachtverkehr
<b>Ø Anzahl an Sitzen</b>	Durchschnittliche Anzahl an Sitzplätzen eines LFZ einer Fluggesellschaft pro Abflug	

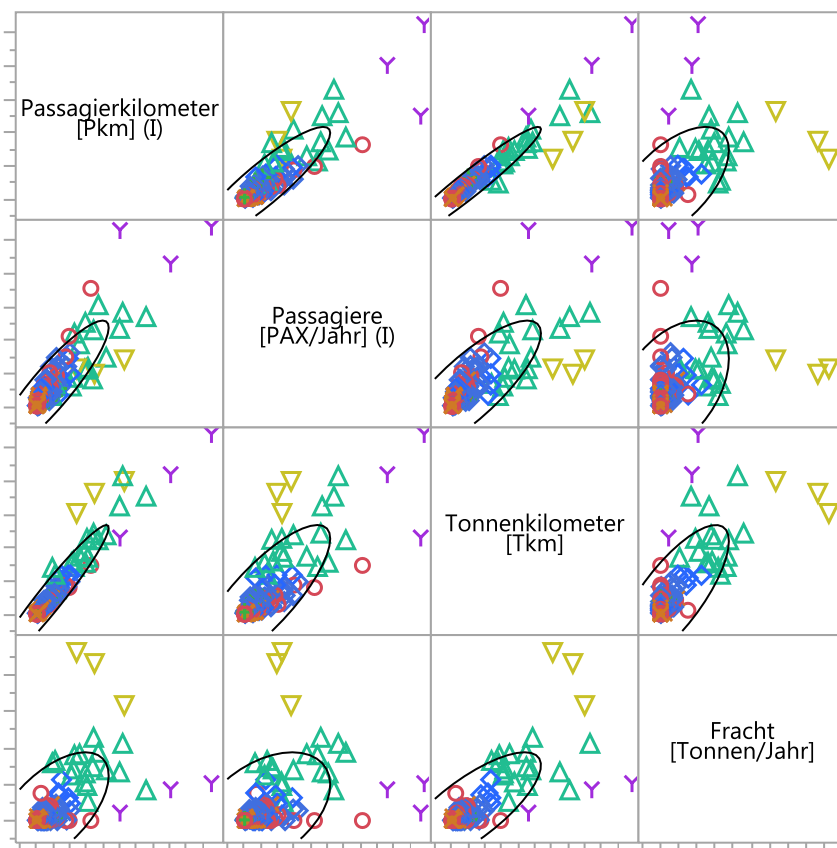
<b>Merkmal</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Einfluss/Auswirkung</b>
<b>Ø LFZ-Geschwindigkeit</b>	Durchschnittliche Geschwindigkeit der LFZ einer Fluggesellschaft über alle Segmente	
<b>Anzahl an Flughäfen</b>	Anzahl an Flughäfen, die eine Fluggesellschaft in einem bestimmten Zeitraum mit ihrem Streckennetz bedient	Kennzahl über den Markt einer Fluggesellschaft
<b>Anzahl an OD-Märkten</b>	Anzahl an OD-Märkten, die Passagiere in einem bestimmten Zeitraum auf Basis des Streckennetzes einer Fluggesellschaft nutzen	Kennzahl über den Markt einer Fluggesellschaft
<b>Netzwerk-Direktheit</b>	Quotient aus der Anzahl der Segmente und der Anzahl der OD-Märkte	Kennzahl über die <i>Hub</i> -Struktur einer Fluggesellschaft; Ist gleich eins, wenn eine Fluggesellschaft nur Direktflüge anbietet
<b>Markt-Dichte</b>	Quotient aus der Anzahl der OD-Märkte abzüglich der minimalen Anzahl der OD-Märkte und der Anzahl der maximal möglichen OD-Märkte abzüglich der minimalen Anzahl der OD-Märkte	
<b>Ø Flugdistanz [km]</b>	Quotient aus den LFZ-Kilometern und den LFZ-Abflügen	Unterscheidungsmerkmal zwischen regional und interkontinental agierenden Fluggesellschaften
<b>Anzahl an Segmenten</b>	Anzahl an Segmenten im Flugnetz einer Fluggesellschaft. Ein Segment ist die direkte Flugroute zwischen zwei Flughäfen.	
<b>Passagier-Direktheit</b>	Die Passagier-Direktheit ist der Quotient aus der Summe aller Segment-Passagiere und der Summe aller OD-Passagier	Spiegelt die durchschnittliche Anzahl der Flüge eines Passagiers pro Reise (OD) mit einer Fluggesellschaft wider [159]
<b>Segment-Dichte</b>	Quotient aus der Anzahl der Segmente abzüglich der minimalen Anzahl der Segmente und der Anzahl der maximal möglichen Segmente abzüglich der minimalen Anzahl der Segmente [159]	
<b>Segment-Gini</b>	Ist die Gleich-/Ungleichverteilung der Segmente	Spiegelt die Zentralität des Netzwerks wider [159]
<b>Markt-Gini</b>	Ist die Gleich-/Ungleichverteilung der OD-Märkte; Ist gleich eins, wenn alle Passagiere auf nur einem OD-Markt fliegen würden (max. Ungleichheit) [159]	
<b>Passagierladefaktor (PLF) [%]</b>	Quotient aus Passagierkilometern und verfügbaren Sitzplatzkilometern multipliziert mit 100	Kennzahl über die durchschnittliche Auslastung der Flüge einer Fluggesellschaft, das heißt, wie viele Sitze eines LFZ der Fluggesellschaft mit Passagieren im Durchschnitt besetzt sind
<b>Gewichtsladefaktor (GLF) [%]</b>	Quotient aus Tonnenkilometern und verfügbaren Sitzplatzkilometern multipliziert mit 100	Kennzahl über die durchschnittliche Auslastung der Flüge einer Fluggesellschaft mit Passagieren und Fracht
<b>Erlös/Passagierkilometer (US\$/Pkm)</b>	Quotient aus dem Erlös und den Passagierkilometern einer Fluggesellschaft	Effizienzkennzahl einer Fluggesellschaft; geläufige Vergleichskennzahl zwischen Fluggesellschaften

Merkmal	Erläuterung	Einfluss/Auswirkung
<b>Erlös/Passagier</b> [US\$/PAX]	Quotient aus dem Erlös und den Passagieren einer Fluggesellschaft	
<b>Erlös</b> [US\$]	Gesamterlös einer Fluggesellschaft	Wesentliche betriebswirtschaftliche Kenngröße
<b>Erlös/Kilometer</b> [US\$/km]	Quotient aus dem Erlös und den LFZ-Kilometern einer Fluggesellschaft	

#### 8.4.2 Korrelationsanalyse der Merkmale von Fluggesellschaften

*Tabelle 8-15: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Merkmale der Größe von Fluggesellschaften.*

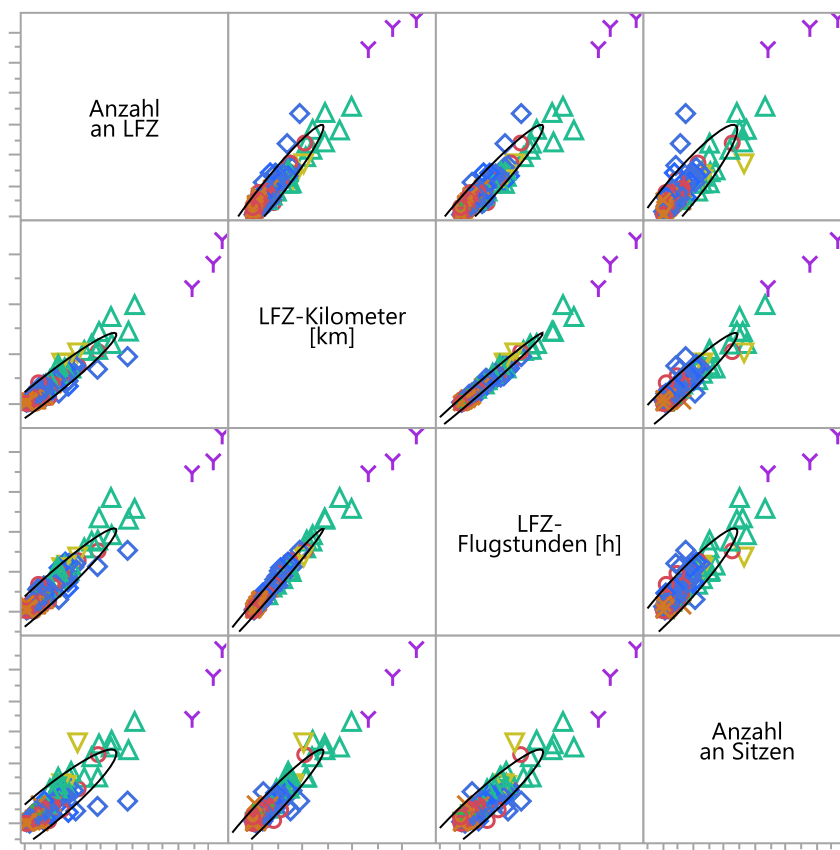
	Passagier-kilometer [Pkm]	Passagiere [PAY/Jahr]	Tonnen-kilometer [Tkm]	Fracht [Tonnen/Jahr]
<b>Passagierkilometer [Pkm]</b>	1,00	0,90	0,96	0,60
<b>Passagiere [PAY/Jahr]</b>	0,90	1,00	0,81	0,44
<b>Tonnenkilometer [Tkm]</b>	0,96	0,81	1,00	0,77
<b>Fracht [Tonnen/Jahr]</b>	0,60	0,44	0,77	1,00



*Abbildung 8-6: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Merkmale der Größe von Fluggesellschaften.*

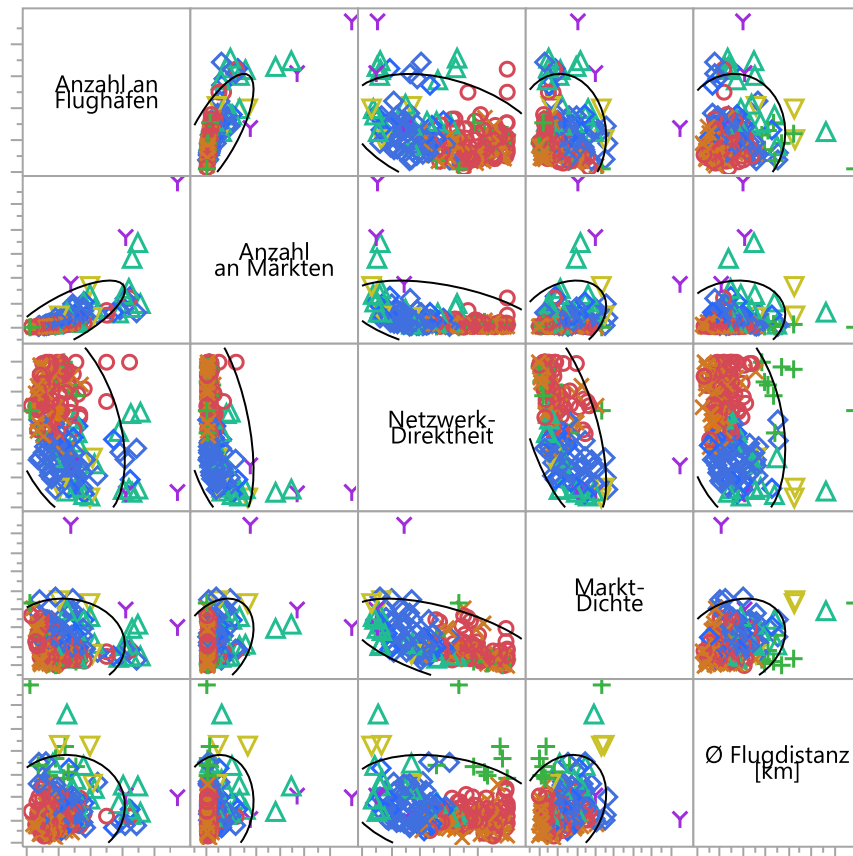
**Tabelle 8-16: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Flottenmerkmale von Fluggesellschaften.**

	Anzahl an LFZ	LFZ-Kilometer [km]	LFZ-Flugstunden [h]	Anzahl an Sitzen
Anzahl an LFZ	1,00	0,97	0,97	0,93
LFZ-Kilometer [km]	0,97	1,00	0,99	0,97
LFZ-Flugstunden [h]	0,97	0,99	1,00	0,95
Anzahl an Sitzen	0,93	0,97	0,95	1,00

**Abbildung 8-7: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Flottenmerkmale von Fluggesellschaften.**

**Tabelle 8-17: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Marktmerkmale von Fluggesellschaften.**

	Anzahl an Flughäfen	Anzahl an Märkten	Netzwerk-Direktheit	Markt-Dichte	Ø Flugdistanz [km]
<b>Anzahl an Flughäfen</b>	1,00	0,75	-0,39	-0,03	0,04
<b>Anzahl an Märkten</b>	0,75	1,00	-0,48	0,34	0,13
<b>Netzwerk-Direktheit</b>	-0,39	-0,48	1,00	-0,60	-0,27
<b>Markt-Dichte</b>	-0,03	0,34	-0,60	1,00	0,27
<b>Ø Flugdistanz [km]</b>	0,04	0,13	-0,27	0,27	1,00

**Abbildung 8-8: Streudiagramm-Matrix ausgewählter Marktmerkmale von Fluggesellschaften.**

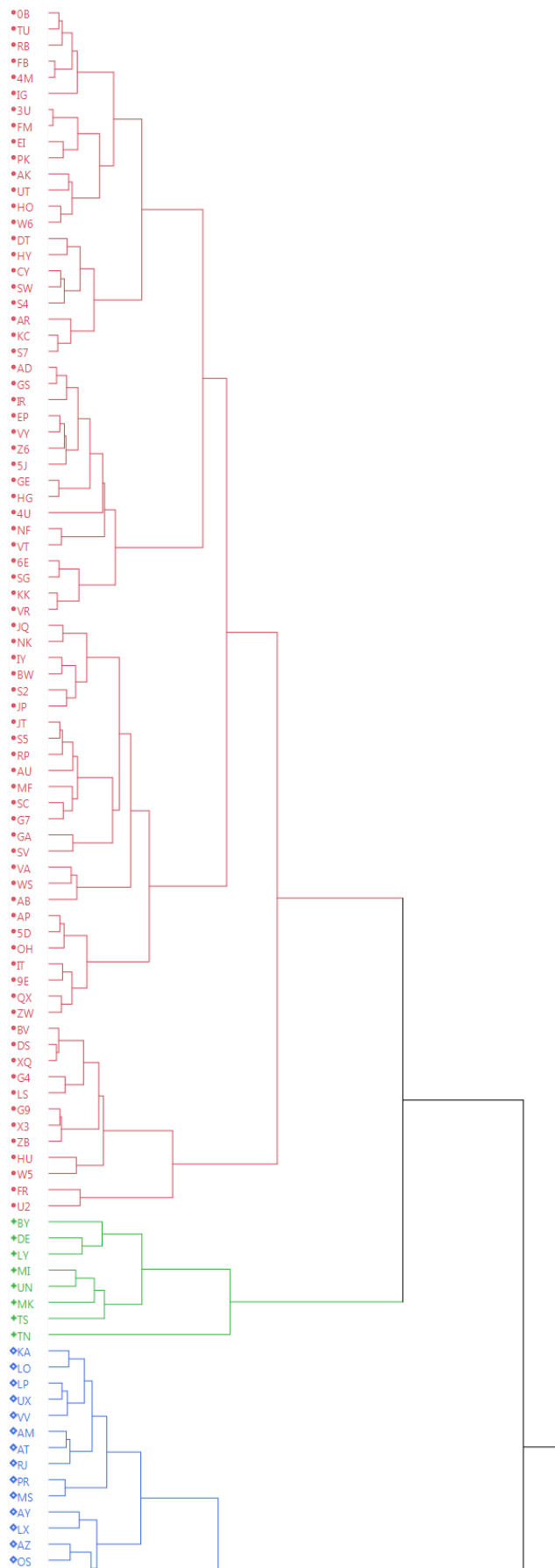
### 8.4.3 Clusteranalyse II - Fluggesellschaften

*Tabelle 8-18: Clusterverlauf der Clusteranalyse II.*

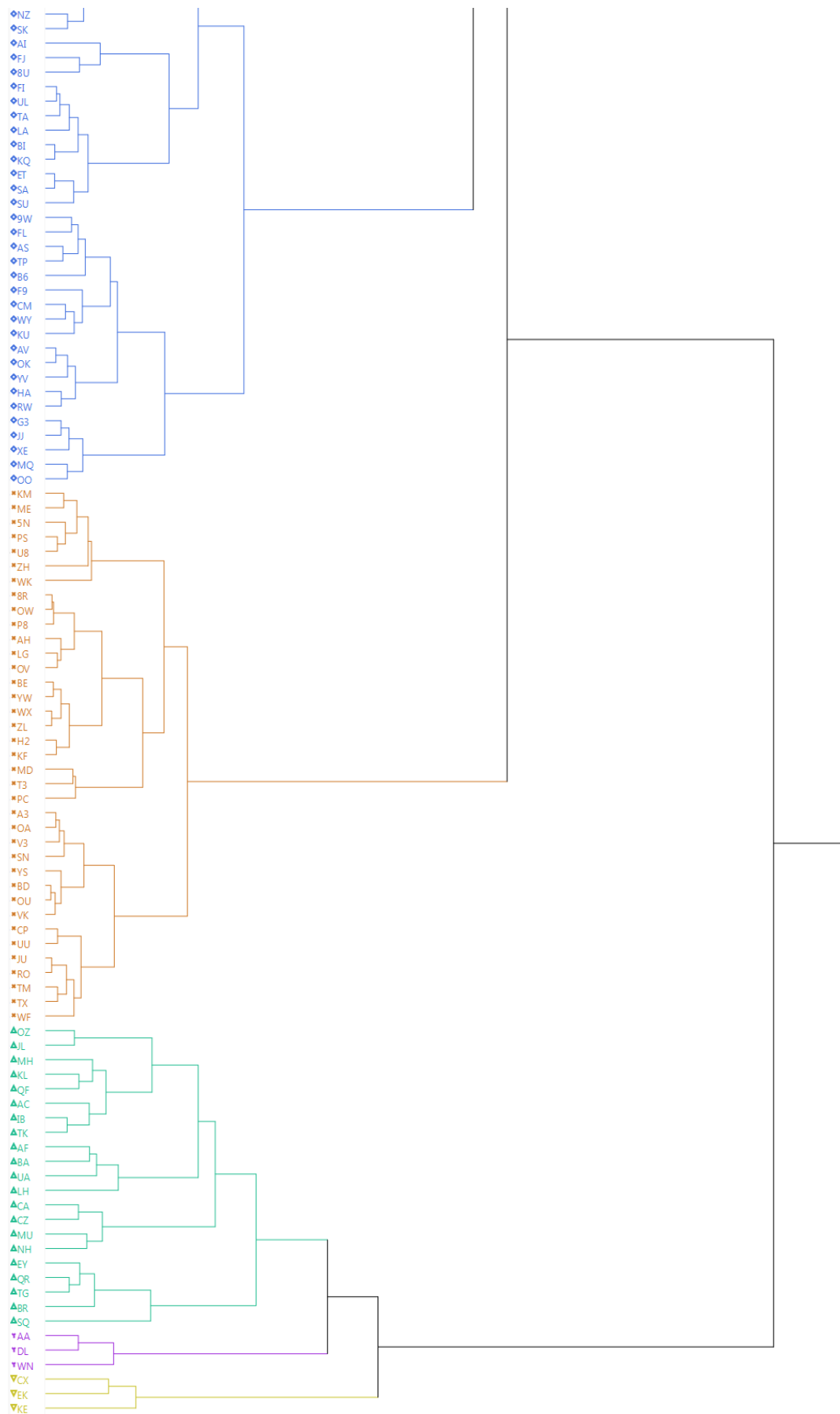
Anzahl d. Cl.	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet	Anzahl d. Cl.	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet
193	0,08610791	3U	FM	96	0,62781923	6E	KK
192	0,12231608	BD	OU	95	0,63195742	MD	T3
191	0,12442413	FB	4M	94	0,63433748	AY	LX
190	0,14089342	JU	RO	93	0,6490049	ET	SU
189	0,14118505	WX	ZL	92	0,65289765	DT	CY
188	0,14808289	8R	OW	91	0,65376519	FR	U2
187	0,15923977	DS	XQ	90	0,65703058	JU	WF
186	0,1617975	AD	GS	89	0,6619036	CM	KU
185	0,17681104	KK	VR	88	0,66395198	8R	AH
184	0,17845871	BE	YW	87	0,66663226	OZ	JL
183	0,18377848	8R	P8	86	0,69074011	AV	HA
182	0,18618575	KC	S7	85	0,69256681	MD	PC
181	0,20504394	BV	DS	84	0,69590475	DE	LY
180	0,20698024	GE	HG	83	0,72299064	KM	5N
179	0,20801959	ET	SA	82	0,72349196	BV	G4
178	0,20890205	0B	TU	81	0,74043014	KA	LP
177	0,21330217	BI	KQ	80	0,75152539	FI	BI
176	0,21448748	6E	SG	79	0,75171846	9W	AS
175	0,2192138	BD	VK	78	0,75644035	AA	DL
174	0,22864307	EP	VY	77	0,75866054	CA	CZ
173	0,22928533	JT	S5	76	0,77216621	KL	QF
172	0,23110113	G9	X3	75	0,7829916	FJ	8U
171	0,23204428	AP	5D	74	0,79004473	EY	QR
170	0,23676195	AV	OK	73	0,79396847	JQ	IY
169	0,23692659	A3	OA	72	0,7962768	AP	IT
168	0,24782208	CY	SW	71	0,81991014	CP	JU
167	0,24908312	HO	W6	70	0,85130384	F9	CM
166	0,24938242	H2	KF	69	0,85826749	AD	GE
165	0,25344012	FI	UL	68	0,86048917	G3	MQ
164	0,26012738	G9	ZB	67	0,88041222	AZ	NZ
163	0,26123523	QX	ZW	66	0,88707692	A3	YS
162	0,26151458	NF	VT	65	0,9038601	KA	AM
161	0,27203504	IY	BW	64	0,91855081	9W	B6
160	0,273236	LG	OV	63	0,94490271	DT	AR
159	0,27338721	PS	U8	62	0,94905084	MI	MK
158	0,27488037	LP	UX	61	0,95365286	MU	NH
157	0,27685408	CP	UU	60	0,98162783	FI	ET
156	0,27736239	0B	RB	59	0,98457763	KM	ZH
155	0,27749412	TM	TX	58	1,0009762	AY	AZ
154	0,2828925	JT	RP	57	1,009796	AC	IB
153	0,28641882	IT	9E	56	1,01643203	AF	BA
152	0,29326407	JQ	NK	55	1,04374445	BV	G9
151	0,29999139	EI	PK	54	1,06075113	3U	AK
150	0,30214814	SC	G7	53	1,06146506	KM	WK
149	0,31685229	AP	OH	52	1,0865759	MH	KL
148	0,31814872	A3	V3	51	1,11311704	BY	DE
147	0,32340647	CY	S4	50	1,12367718	AD	4U



Anzahl der Cluster	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet	Anzahl der Cluster	Distanz	Über- geordnet	Unter- geordnet
146	0,32479356	EP	Z6	49	1,13050163	EY	BR
145	0,32906391	FI	TA	48	1,13990691	BV	HU
144	0,33872329	G4	LS	47	1,16122435	MI	TS
143	0,33873553	PR	MS	46	1,16160958	AD	NF
142	0,3536082	AH	LG	45	1,17910456	AF	UA
141	0,35543633	BE	WX	44	1,20809671	KA	PR
140	0,35571743	G3	JJ	43	1,26256421	AI	FJ
139	0,3561834	YS	BD	42	1,30131054	8R	BE
138	0,35880721	EP	5J	41	1,31480876	CA	MU
137	0,36058089	HA	RW	40	1,33105284	JT	GA
136	0,36323968	AM	AT	39	1,35194875	0B	3U
135	0,37006456	AD	IR	38	1,38803654	AD	6E
134	0,37142242	S2	JP	37	1,39901649	MH	AC
133	0,38103248	DT	HY	36	1,45798005	CX	EK
132	0,38738524	LP	VV	35	1,46875679	JQ	JT
131	0,40021932	AS	TP	34	1,49890003	9W	F9
130	0,41400571	AK	UT	33	1,57551955	AA	WN
129	0,41690976	KA	LO	32	1,5906187	A3	CP
128	0,41783032	KM	ME	31	1,66306229	9W	AV
127	0,42776975	A3	SN	30	1,68140335	AF	LH
126	0,44085355	AM	RJ	29	1,71063553	JQ	VA
125	0,44415394	AZ	OS	28	1,91851911	KA	AY
124	0,45675782	AR	KC	27	1,93966325	0B	DT
123	0,45781535	5N	PS	26	1,94317698	BY	MI
122	0,45887314	CM	WY	25	2,08922397	CX	KE
121	0,46681091	VA	WS	24	2,09509279	JQ	AP
120	0,48379137	IT	QX	23	2,25027512	8R	MD
119	0,484075	JU	TM	22	2,43110219	EY	SQ
118	0,48558489	AK	HO	21	2,46384807	OZ	MH
117	0,48604095	0B	FB	20	2,58332571	BV	FR
116	0,49107008	MF	SC	19	2,74074195	KM	8R
115	0,49711352	IB	TK	18	2,75954458	9W	G3
114	0,50267348	GA	SV	17	2,8586125	AI	FI
113	0,50290169	JT	AU	16	3,2137225	0B	AD
112	0,50343479	MQ	OO	15	3,28419788	KM	A3
111	0,50727432	AV	YV	14	3,53355878	KA	AI
110	0,50869051	NZ	SK	13	3,53456593	OZ	AF
109	0,54195647	G3	XE	12	3,71174375	0B	JQ
108	0,54505077	QR	TG	11	3,78430552	BY	TN
107	0,54728299	FI	LA	10	3,92803219	OZ	CA
106	0,54888603	BE	H2	9	4,59154181	KA	9W
105	0,55944782	IY	S2	8	4,76770161	0B	BV
104	0,56218499	MI	UN	7	4,87456767	OZ	EY
103	0,57432875	HU	W5	6	6,52811969	OZ	AA
102	0,58509716	VA	AB	5	7,388605	0B	BY
101	0,59425684	0B	IG	4	7,69648438	OZ	CX
100	0,59762437	JT	MF	3	9,90351715	0B	KA
99	0,60032025	9W	FL	2	10,6884374	0B	KM
98	0,60306323	3U	EI	1	16,86017331	0B	OZ
97	0,60914191	AD	EP				



**Abbildung 8-9: Dendrogramm Clusteranalyse II (Teil 1), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA Code der FG, vor der Silhouettenoptimierung.**



**Abbildung 8-10: Dendrogramm Clusteranalyse II (Teil 2), x-Achse entspricht Fusionsdistanz, dargestellt ist der IATA Code der FG, vor der Silhouettenoptimierung.**

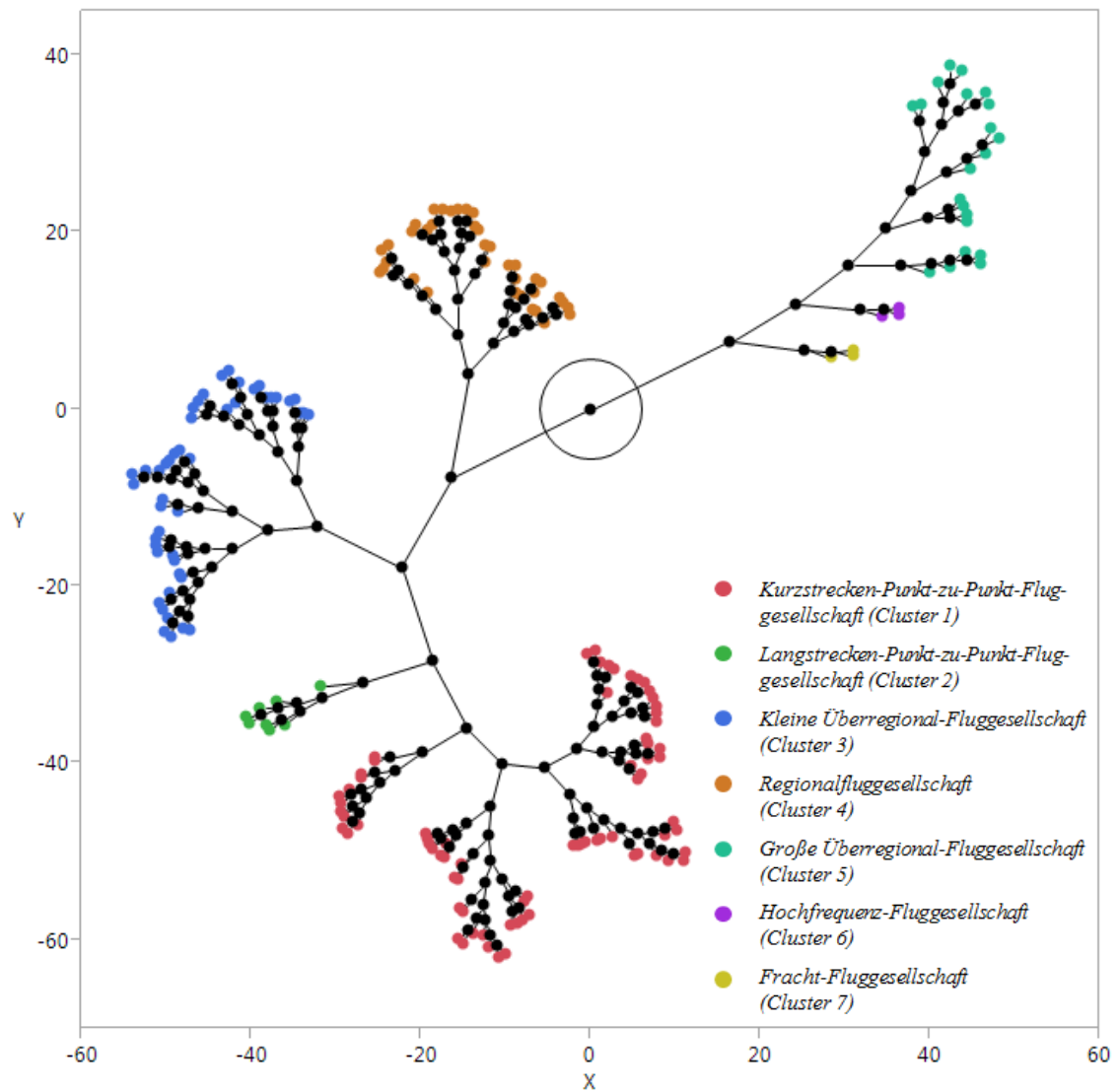


Abbildung 8-11: Konstellationsdiagramm der Clusteranalyse II, vor der Silhouettenoptimierung.

#### 8.4.4 Ergebnisse Clusteranalyse II, Fluggesellschaftsklassen

**Tabelle 8-19: Fluggesellschaften pro Cluster, angegeben ist der IATA Code<sup>198</sup>, unterstrichen sind die FG, die im Zuge der Silhouettenoptimierung die Clusterzugehörigkeit gewechselt haben.**

CI	Region	Clusterelemente (Fluggesellschaften)
1	Afrika	DT;SW;TU;VR
	Nordamerika	G4;G7;OH;QX;RP;S5;WS
	Asien/Pazifik	3U;5J;6E;AK;EP;FM;G9;GA;GE;GS;HO;HU;HY;IR;IY;JT; KC;KK;MF;PK;RB;S2;SC;SG;W5;XQ
	Europa	0B;4U;AB;BV;CY;DS;EI;FB;FR;HG;IG;JP;LS;S4;S7;U2;UT; VY;W6;X3;Z6;ZB
	Ozeanien	JQ;NF;VA;VT
	Süd- und Mittelamerika	4M;AD;AU;BW
2	Afrika	MK
	Nordamerika	BY;TS
	Asien/Pazifik	LY;MI
	Europa	DE;UN
	Ozeanien	TN
3	Afrika	8U;AT;ET;KQ;MS;SA
	Nordamerika	<u>9E</u> ;AM;AS;B6;F9;FL;HA;MQ; <u>NK</u> ;OO;RW;XE;YV; <u>ZW</u>
	Asien/Pazifik	9W;AI;BI; <u>EY</u> ;IT;KA;KU; <u>MH</u> ;NZ;OS;PR;RJ; <u>SV</u> ;UL;WY
	Europa	AY;AZ;FI; <u>IB</u> ;LO;LX;OK;SK;SU; <u>TK</u> ;TP;UX;VV
	Ozeanien	FJ
	Süd- und Mittelamerika	<u>AR</u> ;AV;CM;G3;JJ;LA;LP;TA
4	Afrika	AH;MD;TM;VK
	Nordamerika	<u>5D</u> ;CP;OW;TX
	Asien/Pazifik	ME;PC;ZH;ZL
	Europa	5N;A3; <u>AP</u> ;BD;BE;JU;KF;KM;LG;OA;OU;OV;PS;RO;SN;T3; U8;V3;WF;WK;WX;YS;YW
	Süd- und Mittelamerika	8R;H2;P8;UU
5	Nordamerika	AC;UA
	Asien/Pazifik	BR;CA;CZ;JL;MU;NH;OZ;QR;SQ;TG
	Europa	AF;BA;KL;LH
	Ozeanien	QF
6	Nordamerika	AA;DL;WN
7	Asien/Pazifik	CX;EK;KE

<sup>198</sup> Eine Suchfunktion für IATA Codes von Fluggesellschaften ist unter [www.iata.org/publications/Pages/code-search.aspx](http://www.iata.org/publications/Pages/code-search.aspx) zu finden, zuletzt geprüft am 20. Februar 2018.

**Tabelle 8-20: Clusteranalyse II - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (1).**

Cl	Name	Fracht [Tonnen/Jahr] x 1000			LFZ-Flugstunden [h] x 1000			Netzwerk-Direktheit		
		25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	Kurzstrecken-Punkt-zu-Punkt-FG	0	5	38	42	91	150	0,69	0,81	0,95
2	Langstrecken-Punkt-zu-Punkt-FG	9	19	36	56	111	157	0,69	0,85	0,96
3	Kleine Netz-FG	7	60	137	115	192	326	0,22	0,33	0,42
4	Regional-FG	0	2	4	28	52	95	0,62	0,79	0,91
5	Große Netz-FG	577	709	910	456	581	1 059	0,12	0,30	0,52
6	Hochfrequenz-FG	110	431	515	1 735	1 884	2 208	0,10	0,11	0,29
7	Fracht-FG	1 586	2 165	2 317	554	585	687	0,07	0,13	0,34

**Tabelle 8-21: Clusteranalyse II - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (2).**

Cl	Ø Flugdistanz [km]			Sitzladefaktor (SLF)			Passagiere [PAX/Jahr] x 1000			Ø transportierte Passagiere [PAX]		
	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	910	1 260	1 470	69,55	74,58	79,65	2 209	4 371	9 528	77	115	135
2	2 980	3 360	4 080	70,95	75,69	84,09	1 250	2 264	4 347	116	160	210
3	1 000	1 540	2 040	64,22	68,02	72,08	4 557	7 320	13 603	74	101	119
4	540	810	1 050	52,10	56,25	59,83	695	1 323	3 416	37	53	72
5	1 410	1 900	2 640	63,26	71,24	76,21	17 345	28 588	47 100	89	127	144
6	1 040	2 000	2 070	73,42	74,39	77,48	85 273	108 870	113 400	102	126	132
7	2 570	4 250	4 280	71,70	75,99	85,18	19 031	21 351	31 462	133	198	260

**Tabelle 8-22: Clusteranalyse II - Cluster-spezifische Mediane und Quantile (3).**

Cl	Anzahl an LFZ			Anzahl an Märkten			Erlös [US\$] x 1 000 000			Erlös/Passagier [US\$/PAX] x 1000		
	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q	25 % Q	M	75 % Q
1	17	30	54	103	180	336	269	542	927	111	134	157
2	19	30	47	79	155	269	303	496	1 188	203	278	421
3	36	54	107	295	613	1061	666	1 137	2 389	125	167	212
4	11	18	39	76	96	242	86	182	487	100	130	171
5	108	151	262	685	1486	2671	5 585	8 482	10 766	246	298	372
6	545	614	643	3552	7362	11811	12 413	14 239	23 943	110	167	220
7	120	136	172	839	949	3345	7 423	8 983	12 0934	348	384	472

## 8.5 Anhang E

### 8.5.1 Vergleich von Flughafenentgelten I

*Tabelle 8-23: Analyse der Flughafenentgelte der Boeing 747 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [163].*

	Boeing 747, MTOM: 396 900 kg			
Flughafen IATA Code	Terminal- Passagierentgelt [US\$]	Landeentgelt [US\$]	Gesamtentgelt [US\$]	Gesamtentgelt pro Tonne [US\$]
LHR	24 124	4 024	28 148	70,9
FRA	11 604	2 179	13 783	34,7
LGW	7 447	2 932	10 379	26,2
SIN	6 659	3 550	10 209	25,7
HKG	1 165	3 507	4 672	11,8
AKL	9 796	4 680	14 476	36,5
CHC	2 036	4 622	6 658	16,8
WLG	3 335	3 955	7 290	18,4

*Tabelle 8-24: Analyse der Flughafenentgelte der Boeing 737 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [163].*

	Boeing 737, MTOM: 79 010 kg			
Flughafen IATA Code	Terminal- Passagierentgelt [US\$]	Landeentgelt [US\$]	Gesamtentgelt [US\$]	Gesamtentgelt pro Tonne [US\$]
LHR	7 458	4 024	11 482	145,3
FRA	3 587	656	4 243	53,7
LGW	2 302	2 638	4 940	62,5
SIN	2 003	744	2 747	34,8
HKG	360	925	1 285	16,3
AKL	3 029	932	3 961	50,1
CHC	629	920	1 549	19,6
WLG	1 031	1 459	2 490	31,5



**Tabelle 8-25: Analyse der Flughafenentgelte der Airbus A320 für ausgewählte Flughäfen,**  
**Datenquelle: [163].**

Flughafen IATA Code	Airbus A320, MTOM: 73 474 kg			
	Terminal- Passagierentgelt [US\$]	Landeentgelt [US\$]	Gesamtentgelt [US\$]	Gesamtentgelt pro Tonne [US\$]
LHR	6 906	4 024	10 930	148,8
FRA	3 322	656	3 978	54,1
LGW	2 132	2 638	4 770	64,9
SIN	1860	744	2 604	35,4
HKG	334	925	1 259	17,1
AKL	2804	866	3 670	49,9
CHC	583	856	1 439	19,6
WLG	955	1 356	2 311	31,5

**Tabelle 8-26: Verhältnis der Flughafenentgelte der A320/737 zur 747 für ausgewählte Flughäfen,**  
**Datenquelle: [163].**

Flughafen IATA Code	Verhältnis Boeing 737/Boeing 747	Verhältnis Airbus A320/Boeing 747
LHR	2,05	2,10
FRA	1,55	1,56
LGW	2,39	2,48
SIN	1,35	1,38
HKG	1,38	1,46
AKL	1,37	1,37
CHC	1,17	1,17
WLG	1,72	1,71

## 8.5.2 Vergleich von Flughafenentgelten II

**Tabelle 8-27: Analyse der Flughafenentgelte der Airbus A320 für ausgewählte Flughäfen,**  
**Datenquelle: [219].**

Flughafen IATA Code	Entgelt für eine Ankunft und einen Start [NZ\$]	Gesamtentgelt pro Tonne [NZ\$]
LHR	9 550	129,9
CNS	9 474	128,9
CHC	5 588	76,0
WLG	6 292	85,6
AKL	6 044	82,2
SIN	3 188	43,4
HKG	2 112	28,7
BKK	4 454	60,6

**Tabelle 8-28: Analyse der Flughafenentgelte der Airbus A330 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].**

Flughafen IATA Code	Entgelt für eine Ankunft und einen Start [NZ\$]	Gesamtentgelt pro Tonne [NZ\$]
LHR	16 191	68,0
CNS	18 843	79,2
CHC	10 892	45,8
WLG	10 713	45,0
AKL	11 883	49,9
SIN	6 740	28,3
HKG	4 670	19,6
BKK	9 063	38,1

**Tabelle 8-29: Analyse der Flughafenentgelte der Boeing 777 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].**

Flughafen IATA Code	Entgelt für eine Ankunft und einen Start [NZ\$]	Gesamtentgelt pro Tonne [NZ\$]
LHR	19 020	63,9
CNS	23 036	77,4
CHC	13 248	44,5
WLG	12 887	43,3
AKL	14 463	48,6
SIN	8 160	27,4
HKG	5 642	19,0
BKK	10 814	36,3

**Tabelle 8-30: Verhältnis der Flughafenentgelte der A320 zur A330/ 777 für ausgewählte Flughäfen, Datenquelle: [219].**

Flughafen IATA Code	Verhältnis Airbus A320/Airbus A330	Verhältnis Airbus A320/Boeing 777
LHR	1,91	2,03
FRA	1,63	1,67
LGW	1,66	1,71
SIN	1,90	1,98
HKG	1,65	1,69
AKL	1,53	1,58
CHC	1,46	1,52
WLG	1,59	1,67

## 8.6 Anhang F

### 8.6.1 Beispiel zur Bestimmung der stündlichen SLB-Kapazität

Folgendes Beispiel zeigt das Vorgehen zur Abschätzung der stündlichen SLB-Kapazität nach FAA-RD-74-124 „*Techniques for Determining Airport Airside Capacity and Delay*“ [170] S. 40 ff.

Folgende Informationen werden zur Bestimmung der stündlichen SLB-Kapazität benötigt:

- Wolkenhöhe und Sichtbedingungen - VFR oder IFR.
- SLB-Konfiguration und Nutzungsregeln
- Verkehrsmix [170] S. 19
  - Klasse A: Kleine einmotorige LFZ mit MTOM bis 12 500 lb
  - Klasse B: Kleine zweimotorige LFZ mit MTOM bis 12 500 lb
  - Klasse C: LFZ mit MTOM größer 12 500 lb bis 300 000 lb
  - Klasse D: LFZ mit MTOM größer als 300 000 lb
- Anteil der Ankünfte an den Gesamtflugbewegungen
- Falls VFR-Bedingungen vorliegen, der Anteil von *Touch & Go* Flugbewegungen an den Gesamtflugbewegungen
- Lage der Abrollwege

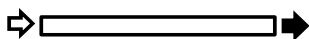
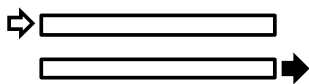
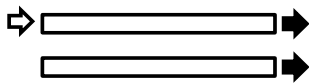
Beispiel: Bestimmung der stündlichen SLB-Kapazität eines Einbahnsystems (Länge: 10 000 ft) unter VFR Bedingungen. Gegeben sind folgende Werte:


- Verkehrsmix: A: 35 %, B: 30 %, C: 30%, D: 5 %
- Anteil der Ankünfte an den Gesamtflugbewegungen: 50 %
- Anteil *Touch & Go* Flugbewegungen: 0 %
- Abrollwege: 3 100 ft, 3 900 ft, 4 700 ft, 5 500 ft, 6 250 ft, 7 000 ft und 10 000 ft entfernt von der Bahnschwelle

- (1) Die SLB-Kapazität soll für ein Einbahnsystem unter VFR Sichtbedingungen bestimmt werden. Dies wird in Abbildung 2-2 in [170] S. 82 ff gesucht (siehe blaue Zellen in Tabelle 8-31). Es wird festgestellt, dass Abbildung 2-3 in [170] S. 82 ff genutzt werden soll um in schritt (4)  $C^*$  zu bestimmen.
- (2) Der *Mix Index* wird berechnet.
 
$$MI [\%] = C + 3D = 30 + 3 + 5 = 45$$
- (3) Aus Abbildung 2-3, linke Seite in [170] S. 82 ff wird  $C^*$  ermittelt.  $C^*$  ergibt sich aus dem Schnittpunkt des *Mix Index* aus (2) mit der Kurve für 50 % Anteil der Ankünfte an den Gesamtflugbewegungen (gegebener Wert) und beträgt hier 65 FB pro Stunde.
- (4) Da VFR Sichtbedingung herrschen, wird der *Touch & Go Factor* aus Abbildung 2-3, rechte Seite (oben) in [170] S. 82 ff bestimmt. Für einen Anteil *Touch and Go* Flugbewegungen von 0 % und einem *Mix Index* von 45 ergibt sich ein *Touch and Go Factor* von 1.
- (5) Der *Exit Factor* wird aus Abbildung 2-3, rechte Seite (unten) in [170] S. 82 ff ermittelt. Da mehr als 4 Abrollwege von der SLB vorhanden sind, ergibt sich ein *Exit Factor* von 1.
- (6) Die stündliche SLB-Kapazität wird durch Multiplikation der Faktoren aus (3), (4) und (5) abgeschätzt.

$$\text{Stündliche Kapazität} \left[ \frac{\text{LFZ}}{h} \right] = C^* * T * E = 65 * 1 * 1 = 65$$

Tabelle 8-31: SLB-Konfiguration und Nutzungsregeln, Auszug aus Abbildung 2-2 in [170] S. 82 ff.

SLB-Konfiguration und Nutzungsregeln	Nr.	SLB-Abstand in [ft]	Abbildungs- und Diagrammnummer in [170]			
			Für Kapazität		Für Verspätung	
			VFR	IFR	VFR	IFR
	1	N.A.	2-3	2-43	2-70	2-89
	2	700 oder mehr	2-4	2-44	2-71	2-90
	3	700 bis 2 499	2-5	2-44	2-72	2-90
	4	2 500 bis 3 499	2-6	2-44	2-73	2-90
	5		2-7	2-44	2-73	2-91
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

 Anflug     Abflug

### 8.6.2 Abschätzung der stündlichen SLB-Kapazität der Flughafencluster

In den folgenden Tabellen werden die stündlichen Kapazitätswerte der einzelnen Flughafenklassen nach Formel (4.4) berechnet. Folgende Annahmen gelten für alle Berechnungen:

- Anteil der ankommenden LFZ: 50 %
- Durchstartfaktor<sup>199</sup>  $T = 1$
- Varianten (graue Felder): +/- 5 % Anteil der LFZ-Kat. M/H

#### Flughafencluster 1 - Internationale Flughäfen

**Tabelle 8-32: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Internationalen FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] $\triangleq C$	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] $\triangleq D$	Stündlicher Kapazitätsbasiswert <sup>200</sup> [LFZ/h] $\triangleq C^*$	Abrollfaktor <sup>201</sup> $\triangleq E$	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagrammnummer <sup>202</sup> in (Techniques for Determining Airport Airside Capacity and Delay 1976)
86,0	13,0	125	1,00 0,91	<b>103</b> 93	2-50 (71)
81,0	18,0	135	1,00 0,91	100 91	
91,0	8,0	115	1,00 0,91	105 95	
86,0	13,0	125	1,00	72	2-48 (69)
81,0	18,0	135	1,00	74	
91,0	8,0	115	1,00	71	

<sup>199</sup> Touch & Go Factor  $T$ .

<sup>200</sup> Hourly Capacity Base [Operations per Hour].

<sup>201</sup> Exit Factor  $E$ .

<sup>202</sup> Diagrammnummer in Abbildung 2-2 in [170] S. 82 ff.

Flughafencluster 2 - Große Regional-Flughäfen**Tabelle 8-33: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Großen Regional-FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] △ C	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] △ D	Stündlicher Kapazitäts-basiswert [LFZ/h] △ C*	Abroll-faktor △ E	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagramm-nummer in [170]
90,0	9,0	117	1,00	<b>59</b>	2-61 (52)
85,0	14,0	127	1,00	60	
95,0	5,0	110	1,00	58	
90,0	9,0	117	1,00	59	2-44 (9)
85,0	14,0	127	1,00	60	
95,0	5,0	110	1,00	58	

Flughafencluster 3 - Kleine Regional-Flughäfen**Tabelle 8-34: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Kleinen Regional-FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] △ C	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] △ D	Stündlicher Kapazitäts-basiswert [LFZ/h] △ C*	Abroll-faktor △ E	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagramm-nummer in [170]
93,0	6,0	111	1,00	<b>53</b>	2-43 (1)
			0,86	45	
88,0	11,0	121	1,00	52	
			0,91	47	
98,0	1,0	101	1,00	54	
			0,86	46	

Flughafencluster 4 - Fracht-Hub-Flughäfen**Tabelle 8-35: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Fracht-Hub-FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] △ C	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] △ D	Stündlicher Kapazitäts-basiswert [LFZ/h] △ C*	Abroll-faktor △ E	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagramm-nummer in [170]
69,0	27,0	150	1,00	<b>120</b>	2-53 (17)
			0,97	116	
64,0	32,0	161	1,00	121	
			0,97	117	
74,0	22,0	140	1,00	120	
			0,97	116	
69,0	27,0	150	1,00	98	2-52(28)
64,0	32,0	161	1,00	97	
74,0	22,0	140	1,00	99	

Flughafencluster 5 - Internationale Hub-Flughäfen**Tabelle 8-36: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Internationalen Hub-FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] $\triangleq$ C	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] $\triangleq$ D	Stündlicher Kapazitäts-basiswert [LFZ/h] $\triangleq$ C*	Abroll-faktor $\triangleq$ E	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagramm-nummer in [170]
62,0	38,0	176	1,00 0,97	<b>121</b> 117	2-57
57,0	43,0	186	1,00 0,97	122 118	
67,0	33,0	166	1,00 0,97	120 116	

Flughafencluster 6 - Hochfrequenz-Hub-Flughäfen**Tabelle 8-37: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Hochfrequenz-Hub-FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] $\triangleq$ C	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] $\triangleq$ D	Stündlicher Kapazitäts-basiswert [LFZ/h] $\triangleq$ C*	Abroll-faktor $\triangleq$ E	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagramm-nummer in [170]
88,0	12,0	124	1,00 0,97	<b>119<sup>203</sup></b> 115	2-57
83,0	17,0	134	1,00 0,97	120 116	
93,0	7,0	114	1,00 0,98	118 115	

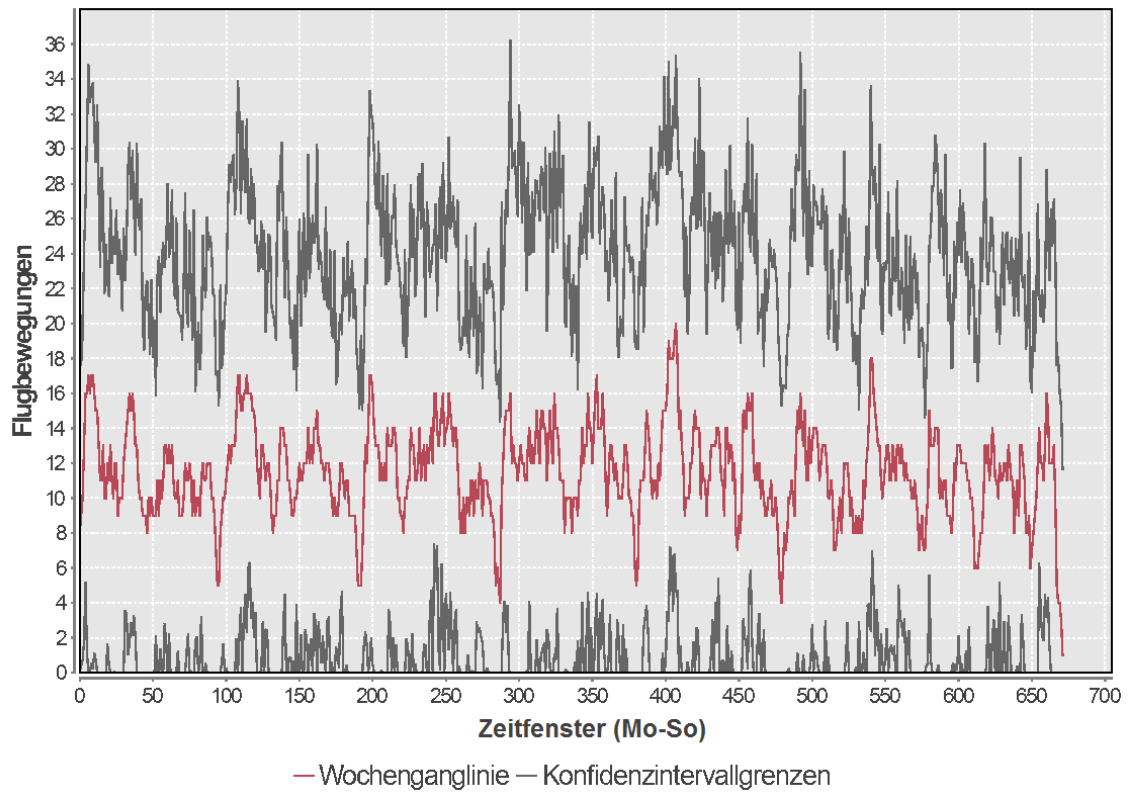
Flughafencluster 7 - Sekundäre Hub-Flughäfen**Tabelle 8-38: Eingangswerte für die Berechnung der stündlichen Kapazität von Sekundäre Hub-FH.**

Anteil LFZ-Kat. M [%] $\triangleq$ C	Anteil LFZ-Kat. H + S [%] $\triangleq$ D	Stündlicher Kapazitäts-basiswert [LFZ/h] $\triangleq$ C*	Abroll-faktor $\triangleq$ E	Stündliche Kapazität [LFZ/h]	Abbildungs- und Diagramm-nummer in [170]
85,0	14,0	127	1,00 0,97	<b>119</b> 115	2-57
80,0	19,0	137	1,00 0,97	120 116	
90,0	9,0	117	1,00 0,98	118 115	

<sup>203</sup> Die Methode weist nur Vorlagen bis zu einem Parallelbahnsystem mit 4 SLB aus. Dadurch ist diese hier berechnete Kapazität nicht repräsentativ.

## 8.7 Anhang G

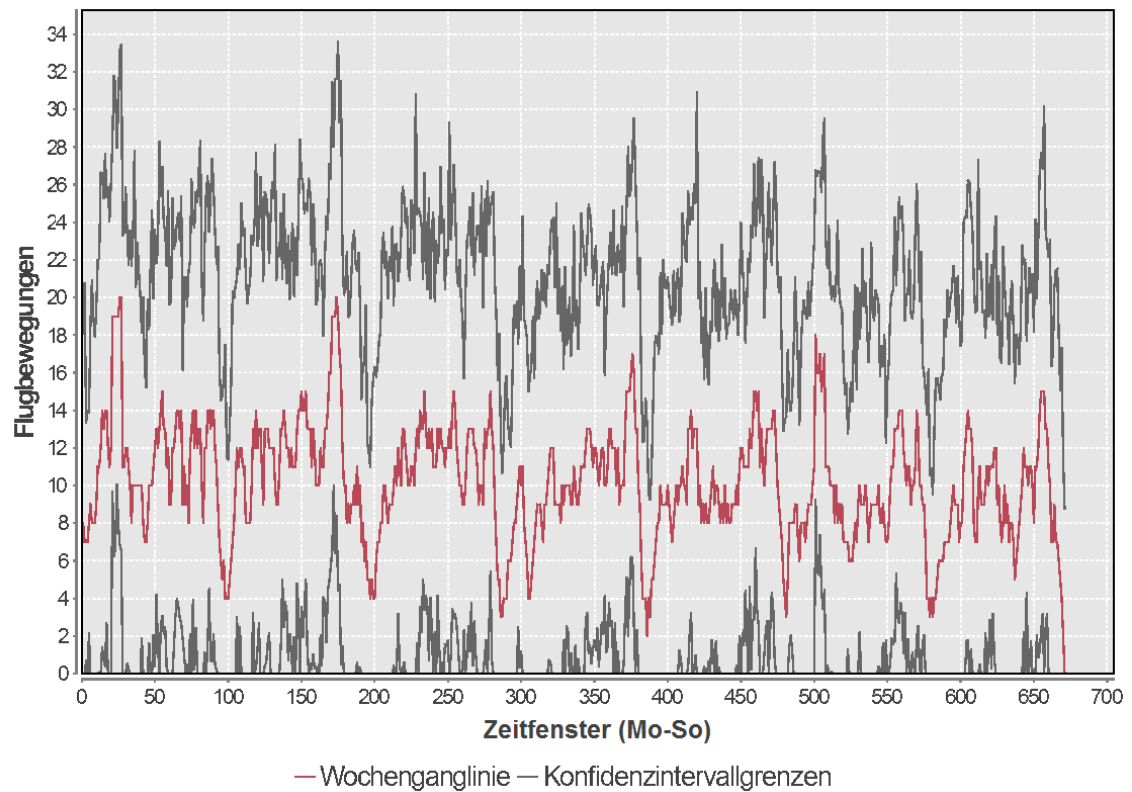
### 8.7.1 Weitere Wochenganglinien der Internationalen Hub-Flughäfen



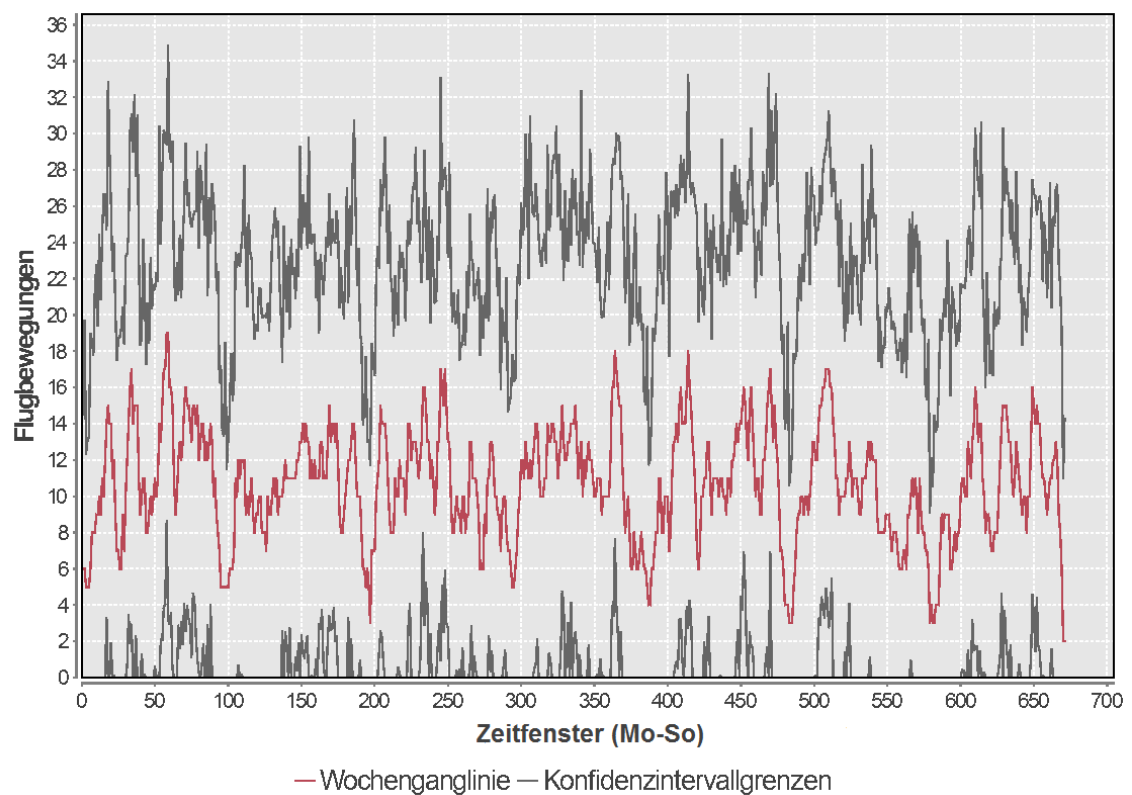
**Abbildung 8-12: Generische Wochenganglinie (Winter, Zeitfenster: 10 min<sup>204</sup>)  
der Abflüge der Internationalen Hub-Flughäfen.**

<sup>204</sup> In Abhängigkeit des betrachteten Zeitfensters ergeben sich unterschiedlich viele Slots. In dieser Abbildung sind es  $\frac{960 \text{ min}}{10 \text{ min}} * 7 \text{ Tage} = 672 \text{ Slots}$ . 960 Minuten entsprechen einer Betriebszeit von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr pro Wochentag. Die Nachstunden (zu denen keine Flugbewegungen stattfinden) sind in der Abbildung nicht dargestellt.



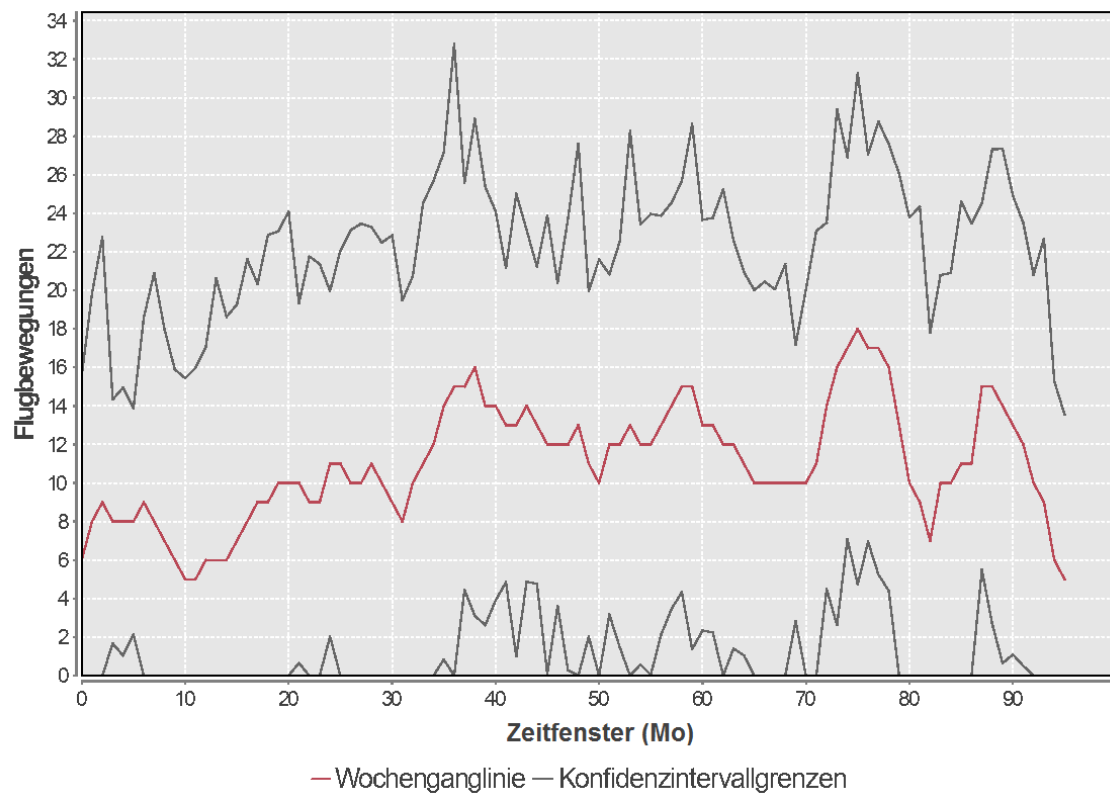


**Abbildung 8-13: Generische Wochenganglinie (Sommer, Zeitfenster: 10 min) der Ankünfte der Internationalen Hub-Flughäfen.**



**Abbildung 8-14: Generische Wochenganglinie (Winter, Zeitfenster: 10 min) der Ankünfte der Internationalen Hub-Flughäfen.**

### 8.7.2 Weitere Tagesganglinie der Internationalen Hub-Flughäfen



**Abbildung 8-15: Generische Tagesganglinie (Montag, Sommer, Zeitfenster: 10 min) der Ankünfte der Internationalen Hub-Flughäfen.**

## 8.8 Anhang H

### 8.8.1 Alternative Quellen für Fallbeispiel II: Nordamerika

*Tabelle 8-39: Zugestiegene Passagiere (Enplanements) und Landed Weight für US-amerikanische Flughäfen, Teilmenge, 2012, Datenquelle: [178].*

Flughafen IATA Code	Name des Flughafens	Enplanements [PAX]	Landed Weight [lb.]
ABQ	Albuquerque International Sunport	2 630 574	568 151 446
ALB	Albany International Airport	1 222 354	161 354 640
ANC	Ted Stevens Anchorage International Airport	2 249 717	16 522 948 234
ATL	Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport	45 798 928	2 027 932 736
AUS	Austin Bergstrom Airport	4 606 252	420 478 700
BDL	Bradley International Airport	2 647 610	728 576 156
BNA	Nashville International Airport	4 797 102	233 138 746
BOS	Boston Logan International Airport	14 293 695	780 913 850
BUR	Bob Hope Airport	-	-
BWI	Baltimore Washington International Airport	11 186 444	488 944 549
CLE	Cleveland-Hopkins International Airport	4 346 941	356 619 999
CLT	Charlotte Douglas International Airport	20 033 816	349 852 877
CMH	Port Columbus International Airport	-	-
CVG	Cincinnati/Northern Kentucky International Airport	2 937 850	3 188 275 844
DAL	Dallas Love Field Airport	-	-
DCA	Ronald Reagan Washington National Airport	-	-
DEN	Denver International Airport	25 799 841	1 204 617 700
DFW	Dallas/Fort Worth International Airport	28 022 904	3 087 615 175
DTW	Detroit Metropolitan Wayne County Airport	15 599 879	666 139 040
EWB	Newark Liberty International Airport	17 055 993	2 854 009 886
FLL	Fort Lauderdale Hollywood International Airport	11 445 103	447 296 904
HNL	Honolulu International Airport	9 225 848	1 976 862 300
HOU	William P. Hobby Airport	-	-
IAD	Washington Dulles International Airport	10 816 216	465 711 225
IAH	Houston George Bush Intercontinental Airport	19 039 000	1 575 814 863
IND	Indianapolis International Airport	3 586 422	4 940 121 920
JAX	Jacksonville International Airport	2 579 023	389 055 455
JFK	New York - John F. Kennedy International Airport	24 520 981	3 494 647 375
LAS	Las Vegas McCarran International Airport	19 959 651	370 201 060
LAX	Los Angeles International Airport	31 326 268	4 204 996 790
LGA	LaGuardia International Airport	-	-
MCI	Kansas City International Airport	4 866 850	427 136 299
MCO	Orlando International Airport	17 159 427	725 505 195
MDW	Chicago Midway Airport	-	-
MEM	Memphis International Airport	3 359 668	20 983 699 672
MIA	Miami International Airport	18 987 488	7 147 983 325
MKE	General Mitchell International Airport	3 710 384	443 125 815
MSP	Minneapolis/St. Paul International Airport	15 943 878	875 841 084

Flughafen IATA Code	Name des Flughafens	Enplanements [PAX]	Landed Weight [lb.]
MSY	Louis Armstrong New Orleans International Airport	4 293 624	302 322 482
OAK	Oakland International Airport	-	-
OKC	Will Rogers World Airport	1 801 650	213 332 230
ONT	Ontario International Airport	2 142 393	2 361 837 263
ORD	Chicago O'Hare International Airport	32 171 795	4 555 097 891
PBI	Palm Beach International Airport	-	-
PDX	Portland International Airport	7 142 620	1 161 531 992
PHL	Philadelphia International Airport	14 589 337	1 883 576 381
PHX	Phoenix Sky Harbor International Airport	19 560 870	1 300 826 546
PIT	Pittsburgh International Airport	3 892 338	394 796 125
PVD	Theodore Francis Green State Airport	1 809 322	104 944 500
RDU	Raleigh-Durham International Airport	4 490 374	381 945 455
RIC	Richmond International Airport	1 582 565	367 949 054
RNO	Reno/Tahoe International Airport	1 685 333	437 385 520
RSW	Southwest Florida International Airport	3 634 152	120 074 350
SAN	San Diego International Airport	8 686 621	682 919 800
SAT	San Antonio International Airport	4 036 625	809 391 614
SDF	Louisville International Standiford Field	1 642 790	11 096 369 031
SEA	Seattle-Tacoma International Airport	16 121 123	1 290 550 381
SFO	San Francisco International Airport	21 284 236	1 197 193 176
SJC	Norman Y. Mineta San José International Airport	4 077 654	256 343 848
SLC	Salt Lake City International Airport	9 579 840	876 163 077
SMF	Sacramento International Airport	4 357 899	287 776 900
SNA	John Wayne Orange County Airport	-	-
STL	St. Louis-Lambert International Airport	6 208 750	349 771 888
TPA	Tampa International Airport	8 218 487	311 542 418
TUL	Tulsa International Airport	1 324 202	316 965 734
TUS	Tuscon International Airport	1 710 649	159 532 800
<b>Summe</b>	-	585 801 356	113 328 000 000

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] GELHAUSEN, Marc C. ; BERSTER, Peter ; WILKEN, Dieter: *Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic?* In: *Journal of Air Transport Management* 28 (2013), S. 3–13
- [2] DIE WELT: *Münchner Bürgerentscheid stoppt dritte Startbahn*. URL [http://www.welt.de/newsticker/dpa\\_nt/infoline\\_nt/brennpunkte\\_nt/article106614465/Muenchner-Buergerentscheid-stoppt-dritte-Startbahn.html](http://www.welt.de/newsticker/dpa_nt/infoline_nt/brennpunkte_nt/article106614465/Muenchner-Buergerentscheid-stoppt-dritte-Startbahn.html) – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [3] SPIEGEL ONLINE: *Bürgerentscheid in München: Startbahngegner stoppen Flughafen-Ausbau*. URL <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/flughafen-muenchen-startbahn-gegner-stoppen-wohl-ausbau-a-839408.html> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [4] NEUE OSNABRÜCKER ZEITUNG: *Geplanter FMO-Ausbau kostete schon 20 Millionen Euro*. URL <https://www.noz.de/lokales/osnabrueck/artikel/558175/geplanter-fmo-ausbau-kostete-schon-20-millionen-euro> – Überprüfungsdatum 2017-11-21
- [5] AIRBUS S.A.S.: *Mapping Demand : Global Market Forecast 2016-2035*. Blagnac Cedex, France, 2016
- [6] EUROCONTROL: *Seven-Year Forecast : Flight Movements and Service Units 2018 - 2024*. February 2018
- [7] SABRE AIRLINE SOLUTIONS: *Market Intelligence (MI) : [Online Database]*. URL [https://www.sabreairlinesolutions.com/home/software\\_solutions/product/market\\_competitive\\_intelligence/](https://www.sabreairlinesolutions.com/home/software_solutions/product/market_competitive_intelligence/) – Überprüfungsdatum 2018-11-01
- [8] AIRBUS S.A.S.: *Future Journeys : Global Market Forecast 2013-2032*. Blagnac Cedex, France, 2013
- [9] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES; Randy Tinseth, Vice President, Marketing (Mitarb.): *Current Market Outlook 2013-2032*. Seattle, WA
- [10] DIE WELT: *Grundsteinlegung für Mega-Flughafen in Istanbul*. URL [http://www.welt.de/newsticker/dpa\\_nt/infoline\\_nt/wirtschaft\\_nt/article128833627/Grundsteinlegung-fuer-Mega-Flughafen-in-Istanbul.html](http://www.welt.de/newsticker/dpa_nt/infoline_nt/wirtschaft_nt/article128833627/Grundsteinlegung-fuer-Mega-Flughafen-in-Istanbul.html) – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [11] THELLE, Martin H. ; LA SONNE, Mie Cour: *Airport competition in Europe*. In: *Journal of Air Transport Management* (2017)
- [12] WILTSHIRE, James: *Airport competition: Reality or myth?* In: *Journal of Air Transport Management* (2017)
- [13] KÖLKER, Katrin ; WENZEL, Steffen ; BIEBLICH, Peter ; LIEBHARDT, Bernd ; LÜTJENS, Klaus ; GOLLNICK, Volker: *Entwicklungstrends bei ausgewählten europäischen Fluggesellschaften*. In: *Internationales Verkehrswesen* 69 (2017), Nr. 2, S. 53–57
- [14] POMPL, Wilhelm ; SCHUCKERT, Markus ; MÖLLER, Claudia: *Netzwerk-Carrier: Ein Geschäftsmodell unter Druck*. In: *Internationales Verkehrswesen* 1 (2006), Nr. 2
- [15] POMPL, Wilhelm ; SCHUCKERT, Markus: *Luftverkehr : Eine ökonomische und politische Einführung*. 5. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (Springer-Lehrbuch)
- [16] GILLEN, David ; GADOS, Alicja: *Airlines within airlines : Assessing the vulnerabilities of mixing business models*. In: *Research in Transportation Economics* 24 (2008), Nr. 1, S. 25–35
- [17] PEARSON, James ; MERKERT, Rico: *Airlines-within-airlines : A business model moving East*. In: *Journal of Air Transport Management* 38 (2014), S. 21–26

- [18] AIRLINERS.DE: *Wie sich die Situation der Presseverlage und Fluggesellschaften gleicht.* URL <http://www.airliners.de/wie-sich-die-situation-der-presseverlage-und-fluggesellschaften-gleicht/28566> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [19] FINANZEN MARKT & MEINUNG: *Airlines: Fürchtet Lufthansa die Konkurrenz aus den Golfstaaten?* URL [http://www.fmm-magazin.de/airlines-fuerchtet-lufthansa-die-konkurrenz-aus-den-golfstaaten-finanzen-mm\\_kat52\\_id6360.html](http://www.fmm-magazin.de/airlines-fuerchtet-lufthansa-die-konkurrenz-aus-den-golfstaaten-finanzen-mm_kat52_id6360.html)
- [20] AIRLINERS.DE: *Eurowings bereitet sich auf Langstrecken-Betrieb vor.* URL <http://www.airliners.de/euowings-a330-langstreckenjet-kurzstrecke/36558> – Überprüfungsdatum 2017-11-24
- [21] N-TV: *Lufthansa-Tochter Eurowings startet ersten Langstreckenflug.* URL <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Euowings-startet-ersten-Langstreckenflug-article16267721.html> – Überprüfungsdatum 2017-11-24
- [22] AERO.DE LUFTFAHRTNACHRICHTEN: *IAG steigt aggressiv in Günstig-Langstrecken ein.* URL <http://www.aero.de/news-26291/Level-fliegt-fuer-IAG-guenstig-in-die-Ferne.html> – Überprüfungsdatum 2017-11-24
- [23] AIRLINERS.DE: *Lufthansa bringt Eurowings-Langstrecke nach Berlin und Düsseldorf.* URL <http://www.airliners.de/lufthansa-euowings-langstrecke-berlin-duesseldorf/42461> – Überprüfungsdatum 2017-11-24
- [24] AIRLINERS.DE: *Billigflieger drängen immer mehr auf die Langstrecke.* URL <http://www.airliners.de/billigflieger-langstrecke-hintergrund/41524> – Überprüfungsdatum 2017-11-24
- [25] AIRLINERS.DE: *Aus Boost wird Joon.* URL [http://www.airliners.de/joon-boost-air-france-klm/41943?utm\\_campaign=readmore&utm\\_medium=articlebox&utm\\_source=air](http://www.airliners.de/joon-boost-air-france-klm/41943?utm_campaign=readmore&utm_medium=articlebox&utm_source=air) – Überprüfungsdatum 2018-10-24
- [26] BERSTER, Peter ; WILKEN, Dieter: *Entwicklung der Low Cost-Carrier in Deutschland, Europa und weltweit.* VDR-Regionalkonferenz Ost, 13. September 2017
- [27] AIRASIA: *5 Year Key Operating Statistics.* URL [http://www.airasiac.com/key\\_operating\\_statistics.html](http://www.airasiac.com/key_operating_statistics.html) – Überprüfungsdatum 2017-09-26
- [28] AERO.DE LUFTFAHRTNACHRICHTEN: *Air Asia will A320-Order auf 300 Einheiten aufstocken.* URL <http://www.aero.de/news-13031/Air-Asia-will-A320-Order-auf-300-Einheiten-aufstocken.html> – Überprüfungsdatum 2017-09-26
- [29] QANTAS AIRWAYS LIMITED: *Qantas Annual Report 2017 : Positioning for Sustainability and Growth*
- [30] BACHWICH, Alexander R. ; WITTMAN, Michael D.: *The emergence and effects of the ultra-low cost carrier (ULCC) business model in the U.S. airline industry.* In: *Journal of Air Transport Management* 62 (2017), S. 155–164
- [31] DALEY, Ben: *Air transport and the environment.* Farnham, Surrey, England, Burlington, VT : Ashgate Pub. Co, 2010
- [32] EUROPEAN COMMISSION: *Flightpath 2050 : Europe's Vision for Aviation.* 22. März 2011
- [33] ALTERNATIVES WÖRTERBUCH: *Generisch.* URL <http://www.awb1.ch/dat/g/generisch.php> – Überprüfungsdatum 2018-10-25
- [34] AIRLINERS.DE: *Frankfurt führt CDA-Anflüge ein.* URL <http://www.airliners.de/frankfurt-fuehrt-cda-anfluege-ein/27244> – Überprüfungsdatum 2018-08-07
- [35] MENSEN, Heinrich: *Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen.* 2. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2013
- [36] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN LUFTVERKEHRSWIRTSCHAFT E.V.: *Betriebszeiten : Planungssicherheit für alle Beteiligten.* URL <https://www.fluglärm-portal.de/laerm-vermeiden/betriebsbeschaenkungen> – Überprüfungsdatum 2017-11-22

- [37] SPIEGEL ONLINE: *Al-Maktum-Airport : Dubai schiebt Flughafen-Erweiterung mit 25 Milliarden Euro an*. URL <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/al-maktum-airport-in-dubai-25-milliarden-euro-fuer-flughafen-a-990549.html>. – Aktualisierungsdatum: 2014-09-09 – Überprüfungsdatum 2014-09-09
- [38] DIE WELT: *Wie China den größten Flughafen der Welt plant*. URL <http://www.welt.de/wirtschaft/article13829699/Wie-China-den-groessten-Flughafen-der-Welt-plant.html> – Überprüfungsdatum 2012-01-23
- [39] DIE WELT: *Grüße an Berlin: Der größte Flughafen der Welt ist voll im Zeitplan*. URL <https://www.welt.de/wirtschaft/article163579600/Der-groesste-Flughafen-der-Welt-ist-voll-im-Zeitplan.html> – Überprüfungsdatum 2018-06-06
- [40] SPIEGEL ONLINE: *Sieben-Milliarden-Euro-Projekt : Norman Foster baut Flughafen für Mexiko-Stadt*. URL <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/mexiko-stadt-norman-foster-baut-neuen-flughafen-a-989765.html>. – Aktualisierungsdatum: 2014-09-04 – Überprüfungsdatum 2014-09-04
- [41] GHOSH, Robin ; SCHILLING, Thomas ; WICKE, Kai: *Theoretical Framework of Systems Design for the Air Transportation System including an Inherently Quantitative Philosophy of Scenario Development*. September 2014
- [42] HANDELSZEITUNG: *Konkurrenzkampf - Türkischer Mega-Flughafen hängt Europa ab*. URL <https://www.handelszeitung.ch/unternehmen/tuerkischer-mega-flughafen-haengt-europa-ab-770664> – Überprüfungsdatum 2018-11-26
- [43] BASEDOW, Jürgen: *Wettbewerb auf den Verkehrsmärkten : Eine rechtsvergleichende Untersuchung zur Verkehrspolitik*. Heidelberg : C.F. Müller, 1989 (Augsburger Rechtsstudien Bd. 5)
- [44] HUSMANN, Nele: *Südostasiatische Länder öffnen ihren Himmel*. URL <http://www.aerotelegraph.com/asean-laender-oeffnen-ihre-himmelstore-asean-liberalisierung> – Überprüfungsdatum 2017-09-26
- [45] KASARDA, John D.: *Global Airport Cities*. Twickenham, UK, 2010
- [46] ATLANTIS - MAGAZINE BY POLIS/PLATFORM FOR URBANISM: *Aerotropolis: The Way We'll Live Next?* Interview mit John D. Kasarda. 2011
- [47] MAURER, Peter: *Luftverkehrsmanagement : Basiswissen*. 4., 4., völlig überarbeitete und erweiterte Aufl. München : De Gruyter, 2007
- [48] ICAO: *Annex 14 : Aerodromes Volume I Aerodrome Design and Operations*. July 2009
- [49] SCHULZ, Axel ; BAUMANN, Susanne ; WIEDENMANN, Simone: *Flughafen Management*. München : Oldenbourg, 2010 (Lehr- und Handbücher zu Tourismus, Verkehr und Freizeit)
- [50] PASSME - *Personalized Airport Systems for Seamless Mobility and Experience (Project)*. URL <https://passme.eu>, zuletzt geprüft am 26. Oktober 2018 – Überprüfungsdatum 2018-10-26
- [51] DORA - *Door to Door Information for Airports and Airlines*. URL <https://dora-project.eu> – Überprüfungsdatum 2018-10-26
- [52] GRAHAM, Anne: *Managing airports : An international perspective*. 3rd ed. Oxford, Burlington, MA : Butterworth-Heinemann, 2008
- [53] WILLIS, Paul: *Low-Cost terminals : no frills & flexibel*, September 2017. In: *Passenger Terminal World*, S. 22–28
- [54] NJOYA, Eric Tchouamou ; NIEMEIER, Hans-Martin: *Do dedicated low-cost passenger terminals create competitive advantages for airports?* In: *Research in Transportation Business & Management* 1 (2011), Nr. 1, S. 55–61
- [55] NEUFVILLE, Richard de ; ODoni, Amedeo R.: *Airport systems : Planning design, and management*. New York : McGraw-Hill, ©2003

- [56] STAMATOPOULOS, Miltiadis A. ; ZOGRAFOS, Konstantinos G. ; ODONI, Amedeo R.: *A decision support system for airport strategic planning*. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 12 (2004), Nr. 2, S. 91–117
- [57] BALTAZAR, Maria E. ; JARDIM, João ; ALVES, Pedro ; SILVA, Jorge: *Air Transport Performance and Efficiency : MCDA vs. DEA Approaches*. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111 (2014), S. 790–799
- [58] KERPEN, Philip: *Praxisorientierte Data Envelopment Analysis*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [59] BRUNETTA, Lorenzo ; RIGHI, Luca ; ANDRETTI, Giovanni: *An Operations Research Model For The Evaluation Of An Airport Terminal: SLAM (Simple Landside Aggregate Model)*
- [60] FARHADI, Farbod ; GHONIEM, Ahmed ; AL-SALEM, Mohammed: *Runway capacity management – An empirical study with application to Doha International Airport*. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 68 (2014), S. 53–63
- [61] MÜHLHAUSEN, Thorsten: *Ein Beitrag zur makroskopischen Simulation von Passagierströmen zwischen kooperierenden Flughäfen unter Nutzung des SYSTEM DYNAMICS Zugangs nach Forrester*. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 1999-06-28
- [62] CLASSEN, Axel: *Aeronautical Study on Seamless Transport (ASSET) : Project Final Report*. April 2011
- [63] RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN: *Aeronautic Study on Seamless Transport (ASSET) : D2.1/D2.2 Annex: Reference Model for Medium-sized and Hub Airport: Processes and Parameters*
- [64] RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN: *Aeronautic Study on Seamless Transport (ASSET) : D2.1/D2.2 Reference model for Medium-sized and Hub Airport: processes and parameters*
- [65] AIRTOPSOFT S.A.: *AirTOP*. URL <http://www.airtopsoft.com> – Überprüfungsdatum 2017-11-22
- [66] ATAC AVIATION ANALYSIS EXPERTS: *Simmod PRO!* URL <http://www.atac.com/simmod-pro.html> – Überprüfungsdatum 2020-01-23
- [67] JEPPESEN: *TAAM*. URL <http://www1.jepesen.com/industry-solutions/aviation/government/total-airspace-airport-modeler.jsp>
- [68] DLR LUFTVERKEHR UND FLUGHAFENWESEN: *Traffic Oriented Microscopic Simulator (TOMICS)*. URL [http://www.dlr.de/fw/desktopdefault.aspx/tabid-5980/9752\\_read-19750/](http://www.dlr.de/fw/desktopdefault.aspx/tabid-5980/9752_read-19750/)
- [69] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *SIMMOD*. URL [http://www.tc.faa.gov/acb300/more\\_simmod.asp](http://www.tc.faa.gov/acb300/more_simmod.asp)
- [70] STERZENBACH, Rüdiger ; CONRADY, Roland ; FICHERT, Frank: *Luftverkehr : Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. 4., grundlegend überarb. und erw. Aufl. München : Oldenburg, 2009 (Lehr- und Handbücher zu Tourismus, Verkehr und Freizeit)
- [71] IATA: *Air Freight Market Analysis*. Dezember 2014
- [72] AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY: *Airport Benchmarking Report - 2014 : Global Standards for Airport Excellence*. Part III Airport Profiles, Methodologies and Data Description. Vancouver, B.C., Canada, June 2014
- [73] AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL: *Airport Economics Survey*. Geneva, Switzerland, 2006
- [74] AMMOSER, Hendrik ; HOPPE, Mirko: *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften : Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens*. 2006
- [75] ICAO: *Financial situation of airports and air navigation services : ANSConf Working Paper No. 3*. 2000



- [76] PELS, Eric ; NIJKAMP, Peter ; RIETVELD, Piet: *Relative efficiency of European airports*. In: *Transport Policy* 8 (2001), Nr. 3, S. 183–192
- [77] KAMP, V. ; NIEMEIER, H.-M. ; MUELLER, J.: *What can be learned from benchmarking studies? : Examining the apparent poor performance of German airports*. In: *Journal of Airport Management* 1 (2007), Nr. 3, S. 294–308
- [78] TOVAR, Beatriz ; MARTÍN-CEJAS, Roberto Rendeiro: *Are outsourcing and non-aeronautical revenues important drivers in the efficiency of Spanish airports?* In: *Journal of Air Transport Management* 15 (2009), Nr. 5, S. 217–220
- [79] VOLKOVA, Nadezda ; MÜLLER, Jürgen ; NIEMEIER, H.-M. ; EHMER, Hansjochen: *Determinants of retail revenue for today's airports : German Airport Performance Project*. 2009
- [80] GRAHAM, Anne: *How important are commercial revenues to today's airports?* In: *Journal of Air Transport Management* 15 (2009), Nr. 3, S. 106–111
- [81] BORK, A.: *Developing a retail marketing strategy to promote both airport and retailers*. In: *Journal of Airport Management* 1 (2006), S. 348–356
- [82] STEWART, Henry: *Customer service and airport retail: stimulate passenger spending*. In: *Journal of Airport Management* 1 (2007), Nr. 2, S. 151–157
- [83] LÖWA, Sonja: *PASSME - Passenger Survey Hamburg Airport 2006-2015*. Internal Report. Hamburg University of Technology (TUHH), 2016
- [84] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Festlegung detaillierter Maßnahmen für die Durchführung der gemeinsamen Grundstandards für die Luftsicherheit (in Kraft getr. am 14. 11. 2015)*. (EU) 2015/1998. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2015
- [85] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN: *Luftsicherheit im Blick*. Berlin, April 2017
- [86] DIE WELT: *Warum ist Wasser am Flughafen so teuer? : EU will Abzocke mit Wasserflaschen beenden*. URL <https://www.welt.de/wirtschaft/article150338588/Warum-ist-Wasser-am-Flughafen-so-teuer.html> – Überprüfungsdatum 2017-10-16
- [87] DER WESTEN: *Wucherpreise für Getränke an deutschen Flughäfen abschaffen*. URL <https://www.derwesten.de/reise/wucherpreise-fuer-getraenke-an-deutschen-flughaeften-abschaffen-id11484388.html> – Überprüfungsdatum 2017-10-16
- [88] FASONE, Vincenzo ; KOFLER, Lukas ; SCUDERI, Raffaele: *Business performance of airports : Non-aviation revenues and their determinants*. In: *Journal of Air Transport Management* 53 (2016), S. 35–45
- [89] WALD, Andreas (Hrsg.): *Aviation Management : Aktuelle Herausforderungen und Trends*. Berlin, Münster : Lit, 2007 (Aviation Management Bd. 1)
- [90] WITTMER, Andreas ; BIEGER, Thomas ; MÜLLER, Roland: *Aviation systems : Management of the integrated aviation value chain*. Berlin, New York : Springer, 2011 (Springer texts in business and economics)
- [91] CHAN, Daniel: *The development of the airline industry from 1978 to 1998 : A strategic global overview*. In: *Journal of Management Development* 19 (2000), Nr. 6, S. 489–514
- [92] JOHNSTONE, H.: *Partnerships Up in the Air*. August 1996
- [93] HIRSCHHAUSEN, Christian von ; BECKERS, Thorsten: *Umfang des regulierten Flughafenbereichs (Single-Till- vs. Dual-Till-Regulierung)*. 25. März 2010
- [94] BARRETT, Sean D.: *How do the demands for airport services differ between full-service carriers and low-cost carriers?* In: *Journal of Air Transport Management* 10 (2004), Nr. 1, S. 33–39
- [95] STATISTIKA GMBH: *Top 20 Fluggesellschaften in Europa*. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/247077/umfrage/top-30-fluggesellschaften-in-europa/>

- [96] AIRLINERS.DE: *Easyjet eröffnet neuen Standort in Hamburg* - *airliners.de*. URL <http://www.airliners.de/easyjet-eroeffnet-neuen-standort-in-hamburg/32009> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [97] AIRLINERS.DE: *Ryanair baut Basen in Deutschland weiter aus*. URL <http://www.airliners.de/ryanair-basis-nuernberg/37855/print> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [98] AIRLINERS.DE: *Ryanair eröffnet wie geplant Basis am Flughafen Frankfurt*. URL <http://www.airliners.de/ryanair-frankfurt-basis/41055> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [99] HEYMANN, Eric: *Regionalflughäfen politisch und wirtschaftlich unter Druck*. 2. Juli 2015
- [100] ZEIT ONLINE: *Flügelahm und überflüssig : Regionalflughäfen haben eines gemeinsam: Kaum Fluggäste. Ist die milliardenteure Misere noch zu beheben?* URL <http://www.zeit.de/2014/34/ regionalflughafen-rostock>. – Aktualisierungsdatum: 2014-08-28 – Überprüfungsdatum 2014-08-28
- [101] AZZAM, Mark: *Eine Analyse der Evolution und Effizienz des Luftverkehrsnetzwerks*. Dissertation. Darmstadt, 2012
- [102] FRIEDRICH, Alfred: *Logik und Fuzzy-Logik : Eine leichtverständliche Einführung mit Beispielen aus Technik und Wirtschaft*. Renningen-Malmsheim : expert-Verl., 1997
- [103] BEDE, Barnabas: *Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013 (295)
- [104] DAENZER, Walter F. ; HABERFELLNER, Reinhard: *Systems Engineering : Methodik und Praxis*. 11. durchges. Auflage. Zürich : Verlag Industrielle Organisation, 2002
- [105] BOSSEL, Hartmut: *Systeme, Dynamik, Simulation : Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt : Books on Demand, 2004
- [106] SCHMITT, Dieter ; GOLLNICK, Volker: *Air Transport System 2016*. Vienna : Springer Verlag GmbH, 2015 (Research Topics in Aerospace)
- [107] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI 3633 : Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen*. 1996
- [108] MAINZER, Klaus: *Komplexität*. Paderborn : UTB, 2008 (UTB Profile 3012)
- [109] XU, Rui ; WUNSCH, Donald: *Survey of Clustering Algorithms*. In: *IEEE Transactions on Neural Networks* 16 (2005), Nr. 3, S. 645–678
- [110] EVERITT, Brian: *Cluster analysis*. 5th ed. Chichester, West Sussex, U.K. : Wiley, 2011 (Wiley series in probability and statistics)
- [111] BACHER, Johann: *Clusteranalyse : Anwendungsorientierte Einführung*. 3. Aufl. München : Oldenbourg, R, 2008
- [112] STEIN, Petra ; VOLLNHALS, Sven: *Grundlage clusteranalytischer Verfahren*. Universität Duisburg-Essen, Institut für Soziologie. 2011-04-01 – Überprüfungsdatum 2017-11-02
- [113] BERKHIN, Pavel: *A Survey of Clustering Data Mining Techniques*. In: KOGAN, Jacob; NICHOLAS, Charles K.; TEBoulLE, Marc (Hrsg.): *Grouping multidimensional data : Recent advances in clustering*. Berlin, New York : Springer, 2006, S. 25–71
- [114] FAHRMEIR, Ludwig: *Statistik : Der Weg zur Datenanalyse*. 6., überarb. Aufl. Berlin : Springer, 2007 (Springer-Lehrbuch)
- [115] SCHÄFER, Thomas: *Methodenlehre II - Clusteranalyse*. TU Chemnitz. 2009-06-24. URL <https://www.tu-chemnitz.de/hsw/psychologie/professuren/method/.../ts/.../meth11.pdf> – Überprüfungsdatum 2. Novemer 2017
- [116] MILLIGAN, Glenn W.: *An examination of the effect of six types of error perturbation on fifteen clustering algorithms*. In: *Psychometrika* 45 (1980), Nr. 3, S. 325–342
- [117] SALVADOR, S. ; CHAN, P.: *Determining the number of clusters/segments in hierarchical clustering/segmentation algorithms*. In: *16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 15th - 17th 2004, S. 576–584

- [118] SIXTL, Friedrich: *Meßmethoden der Psychologie*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Weinheim, Basel : Beltz, 1982
- [119] BORTZ, Jürgen ; SCHUSTER, Christof: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch)
- [120] LAROSE, Daniel T. ; LAROSE, Chantal D.: *Discovering knowledge in data : An introduction to data mining*. Second edition. Hoboken : Wiley, 2014 (Wiley series on methods and applications in data mining)
- [121] SAS INSTITUTE INC. (Hrsg.): *JMP® 11 Multivariate Methods*. Cary, NC, 2014
- [122] TIBSHIRANI, Robert ; WALTHER, Guenther ; HASTIE, Trevor: *Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic*. In: *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 63 (2001), Nr. 2, S. 411–423
- [123] KAUFMAN, Leonard ; ROUSSEEUW, Peter J.: *Finding groups in data : An introduction to cluster analysis*. Hoboken, N.J. : Wiley, 2005 (Wiley-Interscience paperback series)
- [124] DEWULF, wouter: *The strategy of air cargo operators : About carpet sellers and cargo stars : proefschrift*. PhD. Antwerpen : Universiteit Antwerpen, Faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen, 2014 (Proefschriften UA-TEW 2014: 6)
- [125] ÖTTL, Gerald ; BÖCK, Philipp: *An approach to airport categorization - category definition and quantification for air traffic related simulation purposes*. In: *Journal of Aerospace Operations* 1 (2011), 1-2, S. 155–170
- [126] ADIKARIWATTAGE, V. ; BARROS, Alexandre G. de ; WIRASINGHE, S. C. ; RUWANPURA, Janaka: *Airport classification criteria based on passenger characteristics and terminal size*. In: *Journal of Air Transport Management* 24 (2012), S. 36–41
- [127] MAGALHÃES, Liliana ; REIS, Vasco ; MACÁRIO, Rosário: *Can flexibility make the difference to an airport's productivity? : An assessment using cluster analysis*. In: *Journal of Air Transport Management* 47 (2015), S. 90–101
- [128] COSMAS, Alex ; LOVE, Robert ; RAJIWADE, Swapnil ; LINZ, Marco: *Market clustering and performance of U.S. OD markets*. In: *Journal of Air Transport Management* 28 (2013), S. 20–25
- [129] MALIGHETTI, Paolo ; PALEARI, Stefano ; REDONDI, Renato: *Airport classification and functionality within the European network*. In: *Problems and Perspectives in Management* 7 (2009), S. 183–196
- [130] GELHAUSEN, Marc: *Ein Generalized Neutral Logit-Modell zur Prognose von Flughäfen- und Zugangsverkehrsmittelwahl*, 2007
- [131] NACHTIGALL, Karl: *Verkehrssystemtheorie I : Modellierung des Leistungsverhaltens von Verkehrssystemen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrssystemtheorie. 2007
- [132] SACHS, Lothar ; HEDDERICH, Jürgen: *Angewandte Statistik : Methodensammlung mit R ; mit ... 180 Tabellen*. 12., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg [u.a.] : Springer, 2006
- [133] SIBBERTSEN, Philipp ; LEHNE, Hartmut: *Statistik : Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. 2., überarb. Aufl. Berlin : Springer Gabler, 2015 (Springer-Lehrbuch)
- [134] ALLEN, Arnold O.: *Probability, statistics, and queueing theory : With computer science applications*. [Nachdr.]. Boston [and others] : Academic Press, 1978 (Computer science and applied mathematics)
- [135] SCHUMANN, Siegfried: *Repräsentative Umfrage : Praxisorientierte Einführung in empirische Methoden und statistische Analyseverfahren*. 6., aktualisierte Aufl. München : Oldenbourg, 2012 (Sozialwissenschaften 10-2012)

- [136] AIRBUS S.A.S.: *Growing Horizons : Global Market Forecast 2017-2036*. URL <http://www.aircraft.airbus.com/market/global-market-forecast-2017-2036/> – Überprüfungsdatum 2017-11-10
- [137] IATA: *Air Travel Demand : IATA Economics Briefing No 9*. Measuring the responsiveness of air travel demand to changes in prices and incomes. April 2008
- [138] WIT, Jaap G. de ; ZUIDBERG, Joost: *The growth limits of the low cost carrier model*. In: *Journal of Air Transport Management* 21 (2012), S. 17–23
- [139] FRANKFURTER RUNDSCHAU: *Leere Hotels, leere Strände : Tourismus in der Türkei in der Krise*. URL <http://www.fr.de/leben/reise/leere-hotels-leere-straende-tourismus-in-der-tuerkei-in-der-krise-a-336871> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [140] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *Current Market Outlook 2017-2036*. Seattle, WA, July 2017
- [141] KÖLKER, Katrin ; BIEBLICH, Peter ; LÜTJENS, Klaus: *FoAM - From Passenger Growth to Aircraft Movements*. Bordeaux, France, July 2014
- [142] KÖLKER, Katrin ; BIEBLICH, Peter ; LÜTJENS, Klaus: *From passenger growth to aircraft movements*. In: *Journal of Air Transport Management* (2016)
- [143] BIEBLICH, Peter ; WEGMANN, Kai ; LÜTJENS, Klaus ; GOLLNICK, Volker: *A hierarchical metamodeling approach for airline costs*. In: *Journal of Air Transport Management* 71 (2018), S. 193–200 – Überprüfungsdatum 2018-08-20
- [144] AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY: *Airport Benchmarking Report - 2012 : Global Standards for Airport Excellence*. Part III Airport Profiles, Methodologies and Data Description. Vancouver, B.C., Canada, June 2012
- [145] *World Aero Data*. URL [www.worldaerodata.com](http://www.worldaerodata.com) – Überprüfungsdatum 2018-08-01
- [146] AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY: *Airport Benchmarking Report - 2014 : Global Standards for Airport Excellence*. Part I Summary Report. Vancouver, B.C., Canada, June 2014
- [147] NORWEGIAN AIR SHUTTLE ASA: *Annual Report 2014*
- [148] ALPAR, Paul (Hrsg.); ALT, Rainer (Hrsg.); BENSBERG, Frank (Hrsg.); GROB, Heinz Lothar (Hrsg.); WEIMANN, Peter (Hrsg.); WINTER, Robert (Hrsg.): *Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [149] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *Airport Categories*. Washington, DC
- [150] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Mitteilung der Kommission - Gemeinschaftliche Leitlinien für die Finanzierung von Flughäfen und die Gewährung staatlicher Anlaufbeihilfen für Luftfahrtunternehmen auf Regionalflughäfen (in Kraft getr. am 9. 12. 2005). 2005/C 312/01. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2005
- [151] CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY: *The World Factbook : Airports*. URL <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2053.html> – Überprüfungsdatum 2018-10-26
- [152] JACOB, Rüdiger ; DÉCIEUX, Jean Philippe ; HEINZ, Andreas: *Umfrage : Einführung in die Methoden der Umfrageforschung*. 3., überarb. Aufl. München : Oldenbourg, 2013
- [153] LEWIS-BECK, Michael S. ; BRYMAN, Alan: *The Sage encyclopedia of social science research methods*. Thousand Oaks, CA [etc.] : Sage Publications, op. 2004
- [154] BIEBLICH, Peter ; LIEBHARDT, Bernd: *Parametric Reference Airports*. Bergamo, Italy, July 2013
- [155] SWARTZ, K. L.: *Great Circle Mapper*. URL <http://www.gcmap.com>
- [156] SPIEGEL ONLINE: *Frankfurter Landebahn eröffnet: Merkel auf Kurs Northwest*. URL <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/frankfurter-landebahn-eroeffnet-merkel-auf-kurs-nordwest-a-793233.html> – Überprüfungsdatum 2018-06-01

- [157] AVIATIONWEEK: *New Beijing Airport Earmarked For SkyTeam* (September 2012) – Überprüfungsdatum 2018-06-06
- [158] ICAO: *DATA+ : [online data base]*. URL <https://stats.icao.int/>
- [159] LEHNER, Stephan: *Separate Yet Interdependent Networks: The Structure and Function of European Air Transport*, Bd. 476. In: GHOSHAL, Gourab; PONCELA-CASASNOVAS, Julia; TOLKSDORF, Robert (Hrsg.): *Complex networks IV : Proceedings of the 4th Workshop on Complex Networks CompleNet 2013*. Berlin, New York : Springer, 2013 (Studies in Computational Intelligence, 476), S. 109–120
- [160] BRÜTZEL, Christoph: *Die Geschäftsmodelle der Billigflieger*. URL <http://www.airliners.de/die-geschaeftsmodelle-billigflieger-aviation-management/40413>
- [161] AIRLINERS.DE: *Air Berlin stellt den Flugbetrieb ein*. URL <http://www.airliners.de/air-berlin-flugbetrieb/42703> – Überprüfungsdatum 2017-11-14
- [162] WIDEROE'S FLYVESELSKAP AS: *Destinations and Airports*. URL <https://www.wideroe.no/en/tickets/destinations> – Überprüfungsdatum 2018-08-06
- [163] AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY: *Airport Benchmarking Report - 2014 : Global Standards for Airport Excellence*. Part II Full Results and Analysis. Vancouver, B.C., Canada, June 2014
- [164] OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT: *Data : Inflation (CPI)*. URL <https://data.oecd.org/price/inflation-cpi.htm> – Überprüfungsdatum 2017-09-12
- [165] JACOBS, Timothy L. ; GARROW, Laurie A. ; LOHATEPANONT, Manoj ; KOPPELMAN, Frank S. ; COLDREN, Gregory M. ; PURNOMO, Hadi: *Airline Planning and Schedule Development*, Bd. 169. In: BARNHART, Cynthia; SMITH, Barry (Hrsg.): *Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry*. Boston, MA : Springer US, 2012 (International Series in Operations Research & Management Science), S. 35–99
- [166] LOHATEPANONT, Manoj ; BARNHART, Cynthia: *Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment*. In: *Transportation Science* 38 (2004), Nr. 1, S. 19–32
- [167] WENZEL, Steffen ; KÖLKER, Katrin ; BIEBLICH, Peter ; LÜTIJENS, Klaus: *Approach to Forecast Air-Traffic Movements at Capacity-Constrained Airports*. In: *Journal of Aircraft* (2015), S. 1–5
- [168] NADER, Nima ; REICHERT, Götz: *Slotzuweisung auf EU-Flughäfen : cepAnalyse Nr. 10/2012*. Freiburg, 2012
- [169] EASA: *Certification Specifications and Guidance Material for Aerodromes Design CS-ADR-DSN*. Annex to EDD 2016-027-R. 8th December 2016 (3)
- [170] *Techniques for Determining Airport Airside Capacity and Delay*. Faa-RD-74-124. June 1976
- [171] FAA AIRPORT PLANNING AND ENVIRONMENTAL DIVISION: *Airport Capacity Profiles*. July 2014
- [172] ASHFORD, Norman ; MUMAYIZ, Saleh A. ; WRIGHT, Paul H.: *Airport engineering : Design, planning, and development of 21st century airports*. 4th ed. Hoboken, N.J. : Wiley, 2011
- [173] RANDELHOFF, Martin: *[Kurz erklärt] Was ist intermodaler Verkehr?* URL <https://www.zukunft-mobilitaet.net/144710/analyse/intermodalitaet-multimodalitaet-intermodaler-verkehr-multimodal-kombiniert/>. – Aktualisierungsdatum: 2016-03-22 – Überprüfungsdatum 2017-11-03
- [174] AHRENS, Gerd-Axel ; AURICH, Tanja ; BÖHMER, Thomas ; KLOTZSCH, Jeannette ; PITRONE, Anne: *Interdependenzen zwischen Fahrrad- und ÖPNV-Nutzung : Analysen, Strategien und Maßnahmen einer integrierten Förderung in Städten ; Forschungsvorhaben*

- im Rahmen der Umsetzung des nationalen Radverkehrsplanes ; Endbericht.* Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Lehrstuhl für Verkehrs- und Infrastrukturplanung; Projektbericht. Januar 2010. URL <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A657464309/> – Überprüfungsdatum 2017-11-03
- [175] RUHREN, S. von der ; RINDSFÜSER, G. ; BECKMANN, K. J. ; KUHIMHOF, T. ; CHLOND, B. ; ZUMKELLER, D.: *Bestimmung multimodaler Personengruppen : Schlussbericht FE-Nr. 70.724/2003, Forschungsprogramm zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden.* Aachen/Karlsruhe, 2003
- [176] GOOGLE INC.: *Google Maps.* URL [www.google.de/maps](http://www.google.de/maps)
- [177] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN; ENGEMANN, Markus (Mitarb.): *ADV-Monatsstatistik 12/2012.* Berlin, 2013
- [178] FAA PLANNING AND ENVIRONMENTAL DIVISION: *All-Cargo Airports by Landed Weight.* September 2013
- [179] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: *National Statistics and Maps : Freight Facts and Figures.* URL [http://ops.fhwa.dot.gov/Freight/freight\\_analysis/nat\\_freight\\_stats/](http://ops.fhwa.dot.gov/Freight/freight_analysis/nat_freight_stats/) – Überprüfungsdatum 2018-11-08
- [180] IATA: *Air Transport Market Analysis : December 2012.* URL [http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/MIS\\_Note\\_Dec12.pdf](http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/MIS_Note_Dec12.pdf)
- [181] KÜHLING, Jürgen ; BECKERS, Thorsten ; KLATT, Jan Peter: *Entgeltregulierung der deutschen Flughäfen : Reformbedarf aus ökonomischer und juristischer Sicht.* 1. März 2010
- [182] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN FLUGGESELLSCHAFTEN: *Reform der Entgeltregulierung für mehr Kosteneffizienz.* URL <http://www.bdf.aero/themen/flughafenentgelte/entgeltregulierung/> – Überprüfungsdatum 2017-09-19
- [183] CIVIL AVIATION AUTHORITY: *Guidance on the application of the CAA's powers under the Airport Charges Regulations 2011 : CAP 1343.* 2015
- [184] ORBAN, André: *IATA disappointed by Aéroports de Paris 2016-2020 airport charges agreement.* URL <http://www.luchtzak.be/organisations/iata-international-air-transport-association/iata-disappointed-by-aeroports-de-paris-2016-2020-airport-charges-agreement/>
- [185] CZERNY, Achim Ingo ; ZHANG, Anming: *Single-Till Versus Dual-Till Regulation of Airports.* In: *SSRN Electronic Journal* (2015)
- [186] OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT: *Data : Price level indices.* URL <https://data.oecd.org/price/price-level-indices.htm>
- [187] EUROSTAT: *Verbraucherpreisindizes – Inflation und vergleichende Preisniveaus.* URL [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumer\\_prices\\_-\\_inflation\\_and\\_comparative\\_price\\_levels/de](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumer_prices_-_inflation_and_comparative_price_levels/de). – Aktualisierungsdatum: 2017-05-10
- [188] ZEIT ONLINE: *Heathrow bekommt eine dritte Startbahn.* URL <https://www.zeit.de/wirtschaft/2018-06/flughafen-heathrow-london-ausbau-parlament> – Überprüfungsdatum 2018-08-21
- [189] LINKE, Florian: *Intermediate Stop Operations to reduce aviation's emissions and climate impact* (8th FORUM-AE meeting - Green flight and operations Workshop). Brussels, 19.-20. January 2016
- [190] LINKE, Florian ; GREWE, Volker ; GOLLNICK, Volker: *The Implications of Intermediate Stop Operations on Aviation Emissions and Climate.* In: *Meteorologische Zeitschrift* (2016)
- [191] GREWE, Volker ; DAHLMANN, Katrin ; FLINK, Jan ; FRÖMMING, Christine ; GHOSH, Robin ; GIERENS, Klaus ; HELLER, Romy ; HENDRICKS, Johannes ; JÖCKEL, Patrick ; KAUFMANN, Stefan ; KÖLKER, Katrin ; LINKE, Florian ; LUCHKOVA, Tanja ; LÜHRS,

- Benjamin ; VAN MANEN, Jesper ; MATTHES, Sigrun ; MINIKIN, Andreas ; NIKLAß, Malte ; PLOHR, Martin ; RIGHI, Mattia ; ROSANKA, Simon ; SCHMITT, Angela ; SCHUMANN, Ulrich ; TEREKHOV, Ivan ; UNTERSTRASSER, Simon ; VÁZQUEZ-NAVARRO, Margarita ; VOIGT, Christiane ; WICKE, Kai ; YAMASHITA, Hiroshi ; ZAHN, Andreas ; ZIEREIS, Helmut: *Mitigating the Climate Impact from Aviation : Achievements and Results of the DLR WeCare Project*. In: *Aerospace* 4 (2017), Nr. 3, S. 34
- [192] KÖLKER, Katrin ; GHOSH, Robin ; LÜTJENS, Klaus: *Assessing Quality of Air Travel using the Impact of Frequency, Travel Time and Number of Transfers on Passenger Demand*. Singapore, July 2015
- [193] TEREKHOV, Ivan ; GHOSH, Robin ; GOLLNICK, Volker: *A concept of forecasting origin-destination air passenger demand between global city pairs using future socioeconomic scenarios*. Miami, 2015
- [194] GHOSH, Robin ; KÖLKER, Katrin ; TEREKHOV, Ivan: *Future Passenger Air Traffic Modelling: A theoretical Concept to integrate Quality of Travel, Cost of Travel and Capacity Constraints*. Singapore, June 2015
- [195] PORSCHE CONSULTING: *Für Fluggäste in Deutschland ist der Ticketpreis nicht das Wichtigste : Umfrage von Porsche Consulting: Passagiere achten auf Beinfreiheit und sichere Flugzeuge*. URL <https://www.porsche-consulting.com/de/home/news/fuer-fluggaeste-in-deutschland-ist-der-ticketpreis-nicht-das-wichtigste/#image-2> – Überprüfungsdatum 2017-11-16
- [196] Duden, *Die deutsche Rechtschreibung*. 27., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin : Dudenverlag, 2017 (Der Duden in 12 Bänden Band 1)
- [197] SLATER, Keith: *Human comfort*. Springfield, Ill., U.S.A. : C.C. Thomas, 1985
- [198] ZHANG, Luian ; HELANDER, Martin G. ; DRURY, Colin G.: *Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting*. In: *Human Factors* 38 (1996), Nr. 3, S. 377–389
- [199] BUBB, Heiner: *Komfort und Diskomfort : Definition und Überblick*. In: *Ergonomie aktuell* (2003), Nr. 004 – Überprüfungsdatum 2017-11-15
- [200] WOLF, H. ; BUBB, H.: *Ergonomie in der Fahrwerksentwicklung : Wo und wie kann sie dort hilfreich sein?* München, 2005 (Fahrwerk.tech)
- [201] AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL: *Guidelines for Passenger Service at European Airports : The Passenger at the Heart of the Airport Business*. Brussels, Belgium, 2014
- [202] IATA: *Airport Development Reference Manual*. 9th Edition. Montreal, Geneva, January 2004
- [203] ABEYRATNE, Ruwantissa: *Convention on International Civil Aviation : A Commentary*. Cham : Springer International Publishing, 2014
- [204] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Europäischen Agentur für Flugsicherheit (in Kraft getr. am 20. 2. 2008). (EG) Nr. 216/2008. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2008
- [205] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Festlegung von Anforderungen und Verwaltungsverfahren in Bezug auf Flugplätze* (in Kraft getr. am 12. 2. 2014) (2014-02-12). URL <https://www.easa.europa.eu/document-library/regulations/commission-regulation-eu-no-1392014> – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [206] ALMADESIGN: *PASSME Experience Longe*. URL <http://www.almadesign.pt/>
- [207] AIRLINERS.DE: *Alitalia steht unter Fremdverwaltung*. URL <http://www.airliners.de/alitalia-management-insolvenzverwaltung/41300> – Überprüfungsdatum 2017-11-14
- [208] DIE WELT: *Warum Airlines jetzt reihenweise Pleite gehen : Britische Fluggesellschaft ist Pleite*. URL <https://www.welt.de/wirtschaft/article169259152/Warum-Airlines-jetzt-reihenweise-pleite-gehen.html> – Überprüfungsdatum 2017-11-14

- [209] AIRLINERS.DE: *Gegroundete Monarch verhandelte wie Air Berlin mit Easyjet*. URL <http://www.airliners.de/britische-monarch-airlines-boden/42490> – Überprüfungsdatum 2017-11-14
- [210] AIRLINERS.DE: *Lufthansa Group wächst dank Brussels und Air Berlin*. URL <http://www.airliners.de/lufthansa-group-brussels-air-berlin/42322> – Überprüfungsdatum 2017-11-14
- [211] AIRLINERS.DE: *Easyjet übernimmt Air-Berlin-Angebot in Berlin-Tegel*. URL <http://www.airliners.de/easyjet-air-berlin-slots-berlin-tegel/42716> – Überprüfungsdatum 2017-11-14
- [212] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN: *ADV Monatsstatistik : Dezember 2007*
- [213] *International Standard ISO 9000:2005 : Quality management systems — Fundamentals and vocabulary*. Geneva, Switzerland, 15. September 2005
- [214] BIEBLICH, Peter ; WEGMANN, Kai ; LÜTJENS, Klaus: *A Hierarchical Metamodeling Approach for Airline Costs*. Rhodes, Greece, June 2016 (20th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference)
- [215] FJODOR VAN VEEN: *The Neural Network Zoo*. URL <http://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/> – Überprüfungsdatum 2018-10-08
- [216] HEZEL, Nico: *KNN: Was sind künstliche neuronale Netze?* URL <https://data-science-blog.com/blog/2015/09/04/knn-was-sind-kuenstliche-neuronale-netze/> – Überprüfungsdatum 2018-02-19
- [217] REY, Günter Daniel ; WENDER, Karl F.: *Neuronale Netze : Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung*. 1. Aufl. Bern : Huber, 2008 (Programm Verlag Hans Huber Psychologie Lehrbuch)
- [218] HORONJEFF, R. ; MCKELVEY, F.X: *Planning and Design of Airports*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 1994
- [219] LEIGH FISHER MANAGEMENT CONSULTANTS: *Aeronautical Charges Benchmarking : Selected International Airports*. 11th April 2013